中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

§7.2 反相运放电路

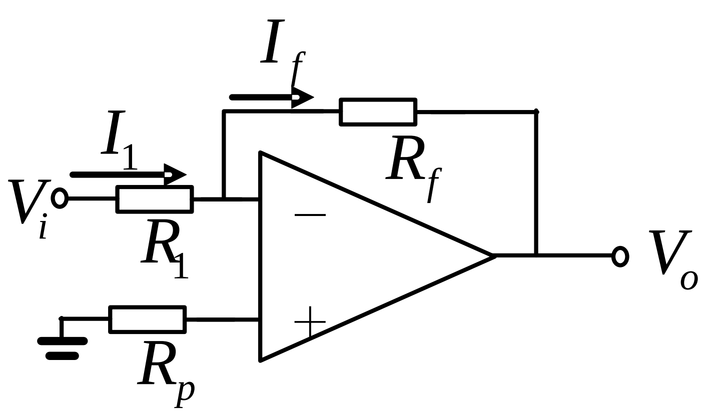
lugh@ustc.edu.cn

2016年12月7日

1. 基本型

- **深度负反馈放大器**
  - 集成运放工作在线性区时，满足深度负反馈条件，则利用反馈网络能够实现各种数学运算

- **电路结构**



$$R_p = R_1 \| R_f$$

环外电阻

电压并联负反馈

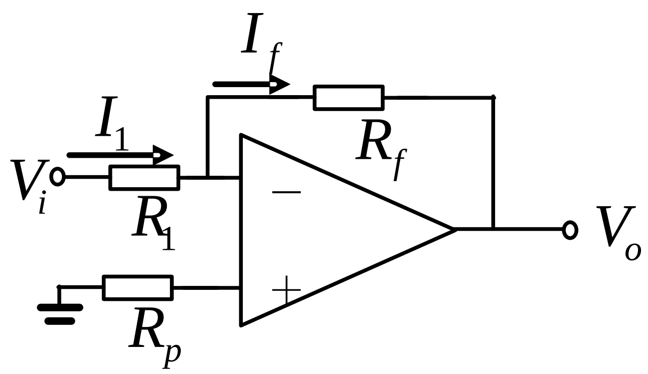
1. 基本型

- 线性区工作特性

$$I_{-}=I_{+}=0$$

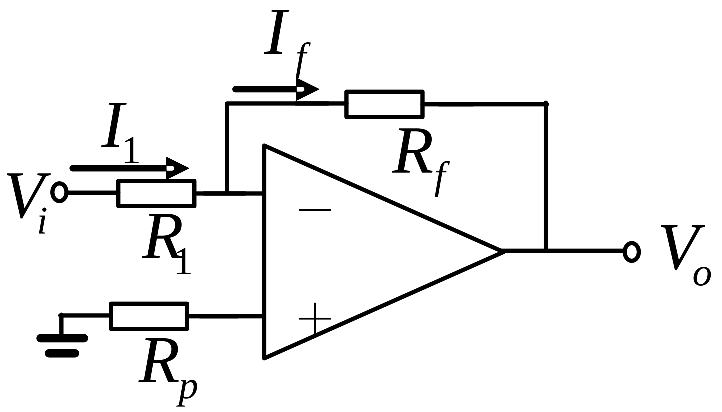
$$V_{-}=V_{+}=0$$

  - 虚地：两输入端没有直接接地，但它们的电位都是地电位
  - “虚短”、“虚断”



1. 基本型

- **工作原理**



$$\left.\begin{array}{l} V_- = V_+ = 0 \\ I_1 = I_f \\ \dfrac{V_i - 0}{R_1} = \dfrac{0 - V_o}{R_f} \end{array}\right\} \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_i$$

1. 基本型

- **输出阻抗**

$$R_{of}=\frac{R_o}{(D_s)_\infty}=\frac{R_o}{\infty}=0$$

- **输入阻抗**

$$R_i=R_1$$

- **线性区工作必须满足如下条件**

$$|V_o|<V_{cc}$$

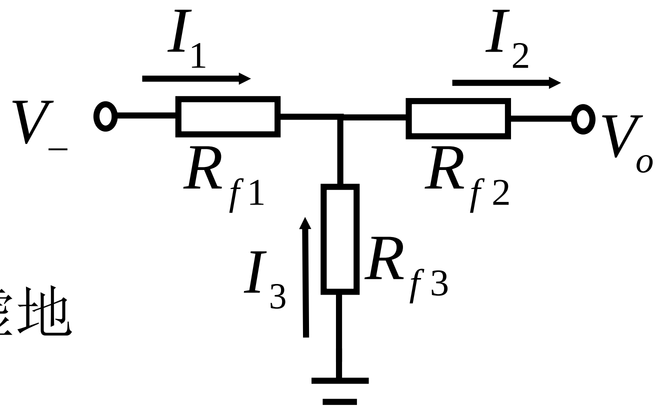
1. 基本型

- **反相运放的优点**
  - 增益控制很方便，且反馈元件都可以变为电抗，如电容、二极管等，构成各种运算电路，应用非常广泛
  - 无共模信号，有限的CMRR 不会对输出造成影响

- **缺点**
  - 电压增益与反馈阻值呈正比，但是阻值太大就会导致精度下降，且噪声大，空气湿度等都可影响阻值大小
  - 输入电阻不高

1. 基本型

- **方法1**
  - 采用T型电阻网络替代R_f



$$\begin{cases} V_o = -I_2(R_{f2} + R_{f1} \| R_{f3}), \qquad V_- \text{虚地} \\ I_1 = I_2 \cdot \dfrac{R_{f3}}{R_{f3} + R_{f1}} \end{cases}$$

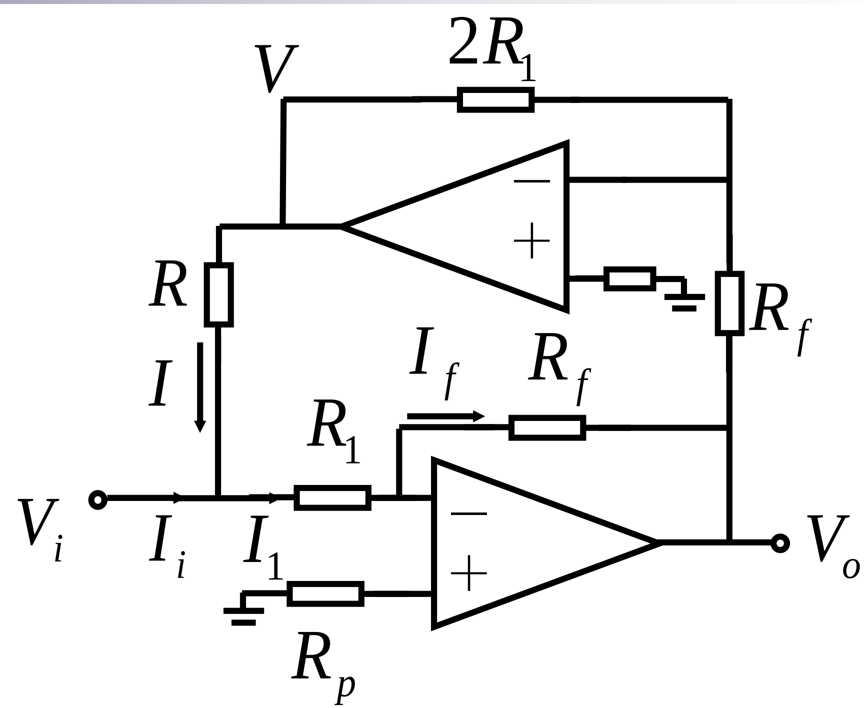
$$R_f = \frac{R_{f2} + R_{f1} \| R_{f3}}{\dfrac{R_{f3}}{R_{f3} + R_{f1}}} = R_{f1} + R_{f2} + \frac{R_{f1} R_{f2}}{R_{f3}}$$

1. 基本型

- **方法2**
  - 采用自举电路

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{I_1 - I}$$

在I_1不变的情况下，I_i减小，R_i有很大提高



$$V = -\frac{2R_1}{R_f} V_o = 2V_i$$

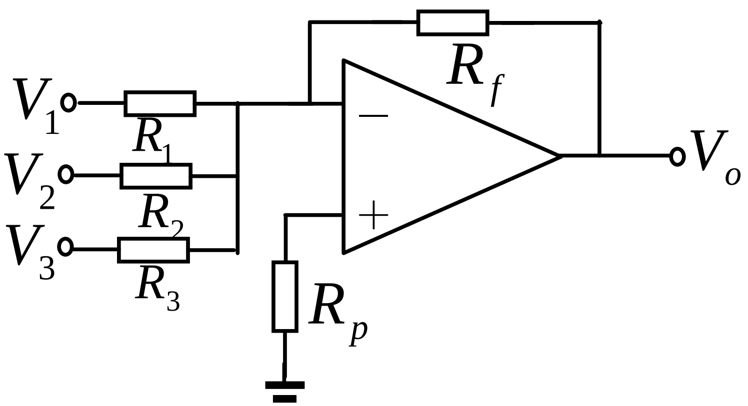
$$R_i = \frac{V_i}{\frac{V_i}{R_1} - \frac{2V_i - V_i}{R}} = \frac{RR_1}{R - R_1}$$

2．反相比例加法器

- **电路结构**

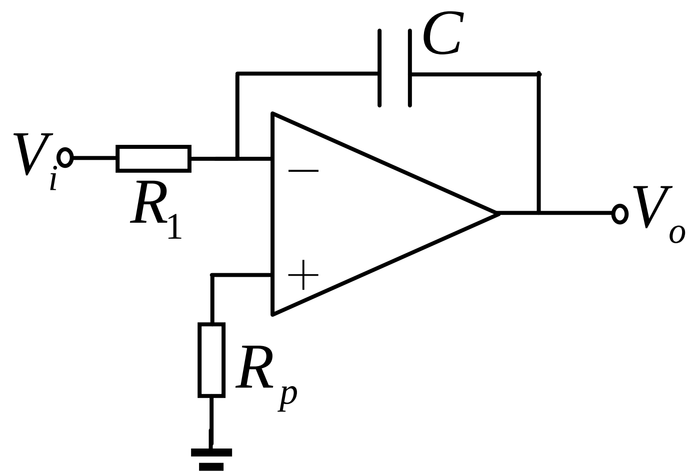
$$\begin{cases} \dfrac{V_1 - V_-}{R_1} + \dfrac{V_2 - V_-}{R_2} + \dfrac{V_3 - V_-}{R_3} = \dfrac{V_- - V_o}{R_f} \\ V_- = V_+ = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3\right)$$



该电路实现了对多路输入信号的反相比例相加，
比例系数可由各电阻决定

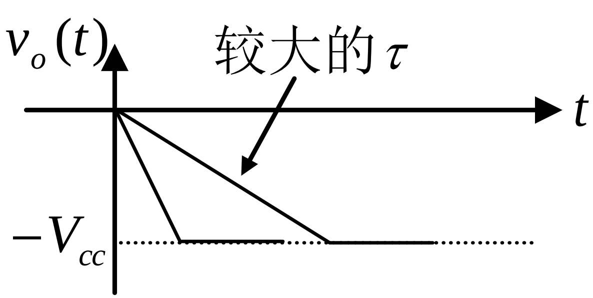
3．反相积分电路



$$V_o = -\frac{\frac{1}{SC}}{R_1} V_i = -\frac{1}{SR_1C} V_i$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{R_1C}\int v_i(t)dt$$

$$\left.\begin{aligned} v_i(t) &= E > 0 \\ v_o(0) &= 0 \end{aligned}\right\} v_o(t) = -\frac{E}{R_1C}t$$

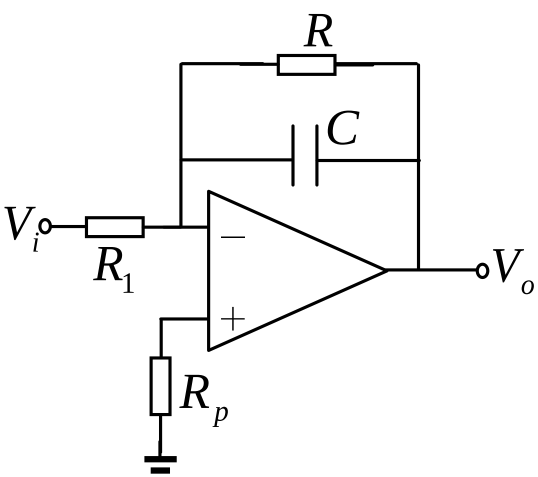


积分电路可用于波形变换，如方波变换成三角波是它的一种简单应用，只要选择合适的时间常数即可

3．反相积分电路

- 缺点
  - 低频信号增益过大

- 有损积分器



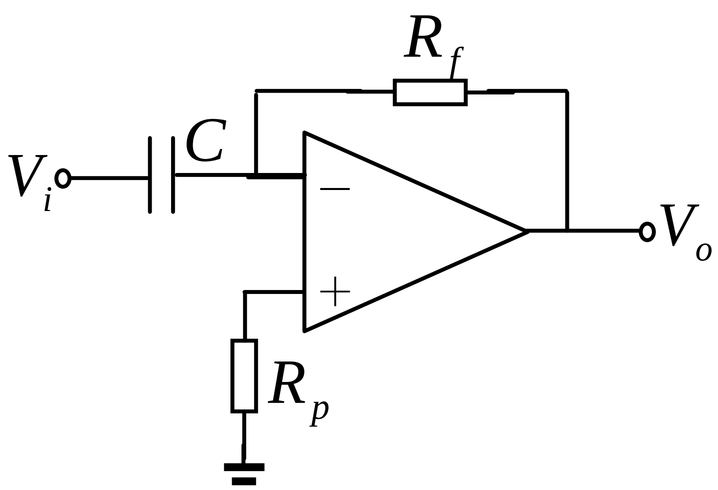
$$A_V(S)=\frac{V_o}{V_i}=-\frac{\frac{R}{1+SRC}}{R_1}=-\frac{R}{R_1(1+SRC)}$$

条件：$\omega>\frac{1}{RC}$

$$v_o(t)=-\frac{1}{R_1C}\int_0^t v_i(t)\cdot e^{-\frac{t}{RC}}dt+v_o(0)$$

4. 反相微分电路

- 基本结构

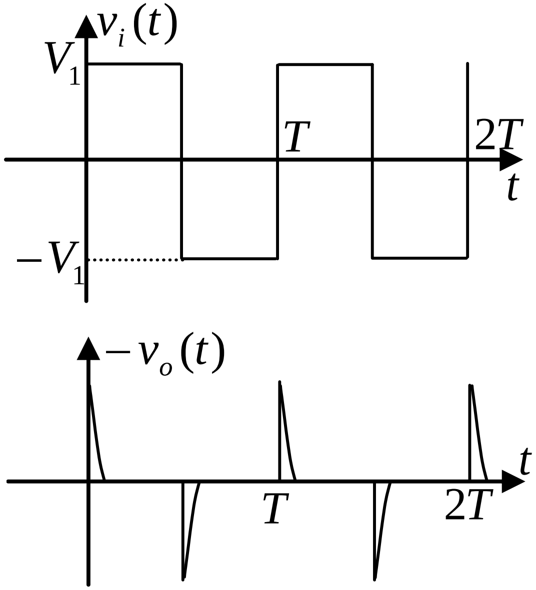


4．反相微分电路

- 工作原理

$$V_o = -\frac{R_f}{\frac{1}{SC}} V_i = -SR_f C V_i$$

$$v_o(t) = -R_f C \frac{dv_i(t)}{dt}$$

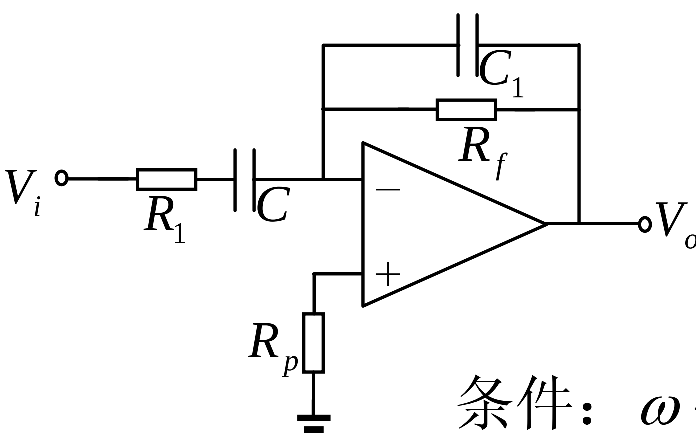


4．反相微分电路

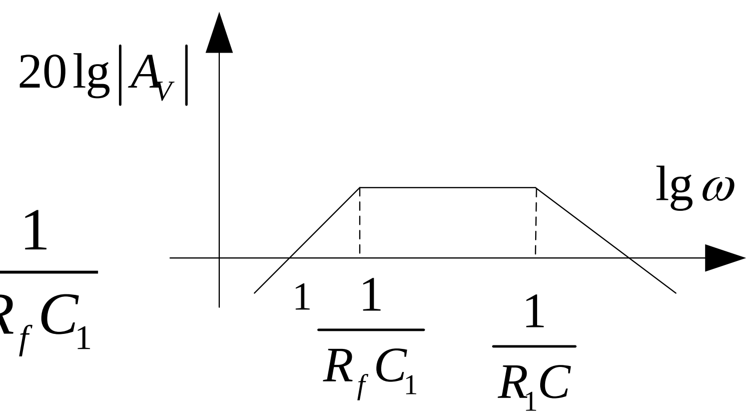
- **缺点**
  - 输出随着频率的增加而加大，容易自激，特别当外部有高频干扰时，容易阻塞运放

- **实用电路**

$$A_V=\frac{V_o}{V_i}=-\frac{\dfrac{R_f}{1+sR_fC_1}}{R_1+\dfrac{1}{sC}}=\frac{-sR_fC}{\left(1+sR_fC_1\right)\left(1+sR_1C\right)}$$

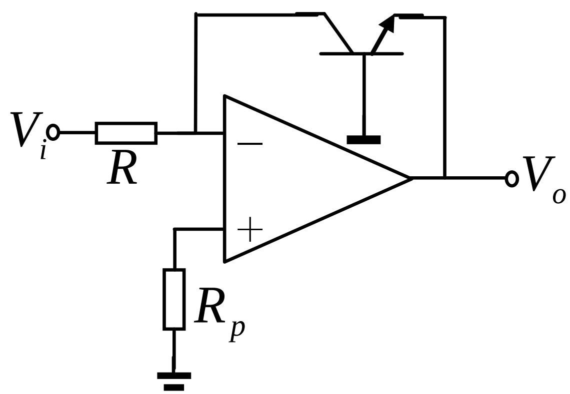


条件：$\omega<\dfrac{1}{R_fC_1}$



5．对数和反对数运算电路

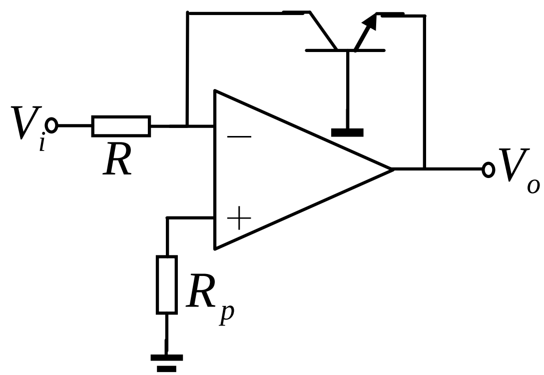
- 电路结构



- 说明
  - 为了保证发射结正偏，输入电压必须大于0，否则应用PNP管替换NPN管

5．对数和反对数运算电路

- 工作原理



$$\begin{cases} I_E = I_S(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1) \approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \Rightarrow V_{BE} = V_T \ln \dfrac{I_E}{I_S} \\ V_{BE} = -V_o \end{cases}$$

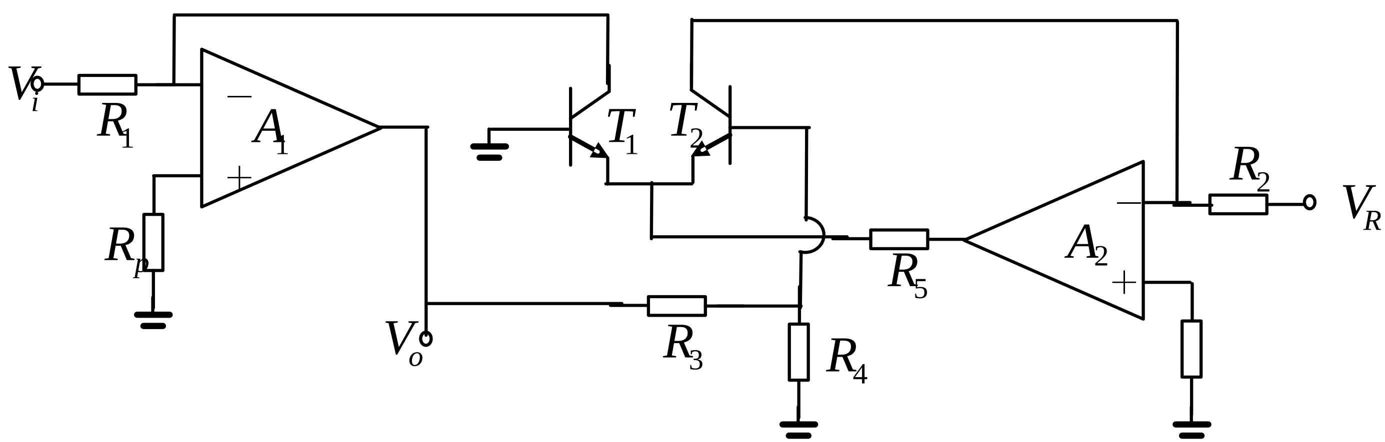
$$\Rightarrow V_o = -V_{BE} = -V_T \ln \frac{I_E}{I_S} \approx -V_T \ln \frac{I_C}{I_S} = -V_T \ln \frac{V_i}{I_S R}$$

5．对数和反对数运算电路

- **缺点**
  - 输出动态范围受发射极电压限制，太小
  - 输出电压受温度的影响严重，温度稳定性差

5．对数和反对数运算电路

- **改进型电路**
  - 利用具有一致参数的两个管子，设计参数补偿电路，或者说对称性电路，消除I_S的影响
  - 选取R_4为与V_T同温度系数电阻，消除V_T的影响



5．对数和反对数运算电路

- ## 工作原理

$$\begin{cases} V_{B2} = \dfrac{R_4}{R_3 + R_4} V_o = V_{B2} - V_{B1} = V_{BE2} - V_{BE1} \\ V_{BE2} - V_{BE1} = V_T \ln \dfrac{I_{C2}}{I_S} - V_T \ln \dfrac{I_{C1}}{I_S} = V_T \ln \dfrac{I_{C2}}{I_{C1}} = V_T \ln \dfrac{\dfrac{V_R}{R_2}}{\dfrac{V_i}{R_1}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot V_T \ln \frac{\dfrac{V_R}{R_2}}{\dfrac{V_i}{R_1}} = -\frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot V_T \ln \frac{V_i}{V_R \cdot \dfrac{R_2}{R_1}} = -K \lg \frac{V_i}{V_R}$$

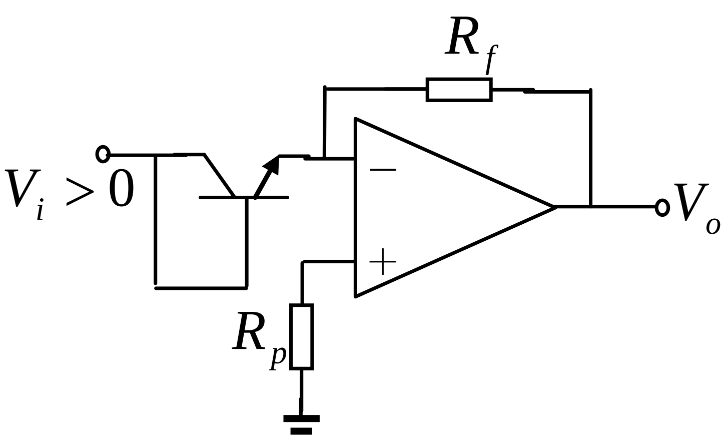
5．对数和反对数运算电路

- 参考电压的选取
  - 选取适当的参考电压，可使得该电路动态范围达到最大

$$\left.\begin{array}{l} V_i \in \left[V_{i\min}, V_{i\max}\right] \\ V_o \in \left[-V_{CC}, +V_{CC}\right] \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{l} -K\lg\dfrac{V_{i\min}}{V_R} = +V_{CC} \\ \\ -K\lg\dfrac{V_{i\max}}{V_R} = -V_{CC} \end{array}\right. \Rightarrow V_R = \sqrt{V_{i\min}V_{i\max}}$$

5．对数和反对数运算电路

- 反对数运算电路



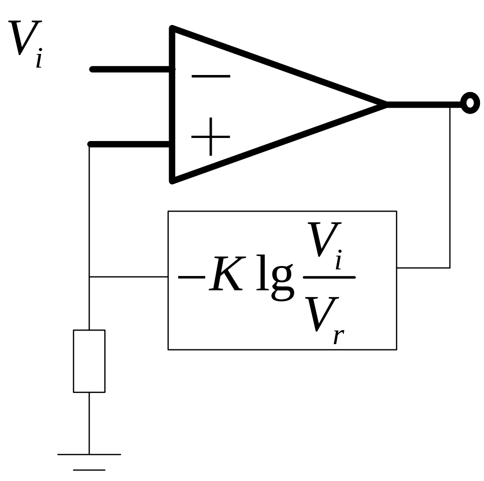
$$I_E = I_f = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = -\frac{V_o}{R_f}$$

$$\Rightarrow V_o = -R_f I_S e^{\frac{V_i}{V_T}}$$

5．对数和反对数运算电路

- **缺点**
  - 输入动态范围受发射极电压限制，太小
  - 输出电压受温度的影响严重，温度稳定性差

- **实用化改进**



$$V_+ = V_i = -K\lg\frac{V_o}{V_r}$$

$$\Rightarrow V_o = V_r e^{-\frac{V_i}{K}}$$