



模拟电路基础（下）

集成运算放大器的应用



➤ 教学要求

- 1 掌握比例、加减法运算电路的原理及分析设计方法
- 2 了解积分微分、对数反对数、乘除运算电路原理与分析方法
- 3 掌握滤波的基本概念、分类，掌握一阶有源滤波电路的设计分析方法
- 4 掌握电压比较器的原理及分类，掌握阈值电压以及传输特性的分析方法

➤ 教学重点

- 1 比例运算电路的分析设计方法
- 2 一阶有源滤波电路的设计分析方法
- 3 电压比较器的设计分析方法

第7章 集成运算放大器的应用

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 教学难点

- 1 比例运算、加减法运算电路的设计分析方法
- 2 一阶有源滤波电路分析频响的方法

➤ 教学学时

- 1 理论学时6学时
- 2 实践学时4学时

7.1 基本运算电路

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 比例运算电路

1. 反向比例运算

R_2 引入了电压并联负反馈，故运放工作在线性区。

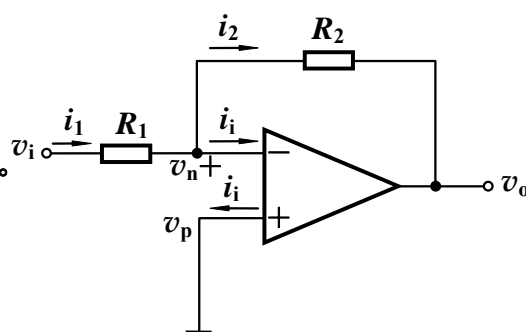
根据虚短和虚断的概念有 $v_n \approx v_p = 0$, $i_i = 0$

所以 $i_1 = i_2$

$$\text{即 } \frac{v_i - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_2} \quad A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$R_o \rightarrow 0 \quad R_i = R_1$$

优点：无共模输入，抗干扰能力强。 **缺点：**输入电阻低，不宜匹配高阻电压源。



反相比例放大电路

7.1 基本运算电路

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 比例运算电路

1. 反向比例运算

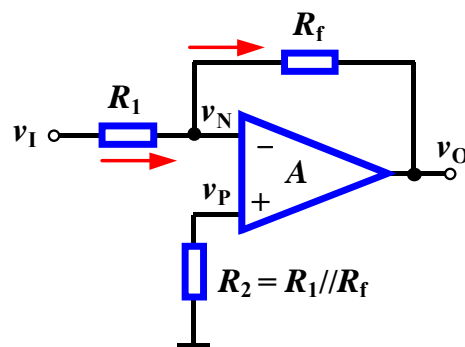
设计要求: $R_i = 1\text{M}\Omega$, $A_v = -100$

解: $R_1 = R_i = 1\text{M}\Omega$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

$$R_f = |A_v| R_1 = 100\text{M}\Omega$$

$$R_2 = R_1 // R_f \approx 1\text{M}\Omega$$



问题: 为实现大增益需要更大的阻值

7.1 基本运算电路

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 比例运算电路

1. 反向比例运算

$$i_1 \approx i_2 \Rightarrow v_M = -\frac{R_2}{R_1} v_1$$

$$i_2 + i_3 = i_4 \Rightarrow \frac{0 - v_M}{R_2} + \frac{0 - v_M}{R_3} = \frac{v_M - v_o}{R_4}$$

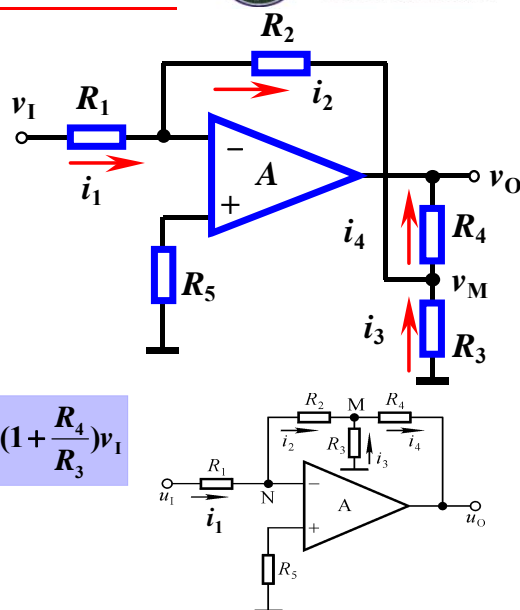
$$v_o = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) R_4 v_M = -\left(R_2 + R_4 + \frac{R_2 R_4}{R_3} \right) \frac{v_1}{R_1}$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad v_o = -\left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right) v_1 \approx -\left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) v_1$$

取: $R_2 = R_1 = R_i = 1\text{M}\Omega$ $R_2 \gg R_3, R_4 (\text{k}\Omega)$

$$R_4 = 99\text{k}\Omega$$

$$R_3 = 1\text{k}\Omega$$



7.1 基本运算电路

比例运算电路

2. 同向比例运算

R_1 、 R_2 引入了电压串联负反馈，故运放工作在线性区。

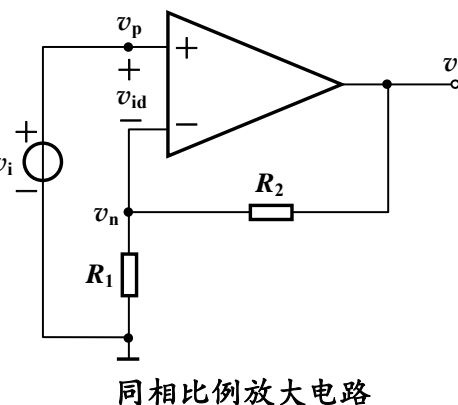
根据虚短和虚断的概念有 $v_p \approx v_n$, $i_p = -i_n = 0$

$$\text{所以 } v_i = v_p = v_n = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_o$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_o \rightarrow 0 \quad R_i \rightarrow \infty$$

优点：输入电阻高，匹配高阻电压源。 **缺点：**存在共模输入，选 K_{CMR} 高的运放。



7.1 基本运算电路

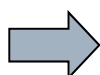
比例运算电路

3. 差动比例运算

从结构上看，它是反相输入和同相输入相结合的放大电路。

根据虚短、虚断和N、P点的KCL得：

$$\begin{cases} v_n = v_p \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_4} \\ \frac{v_{i2} - v_p}{R_2} = \frac{v_p - 0}{R_3} \end{cases}$$



$$v_o = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1} \right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) v_{i2} - \frac{R_4}{R_1} v_{i1}$$

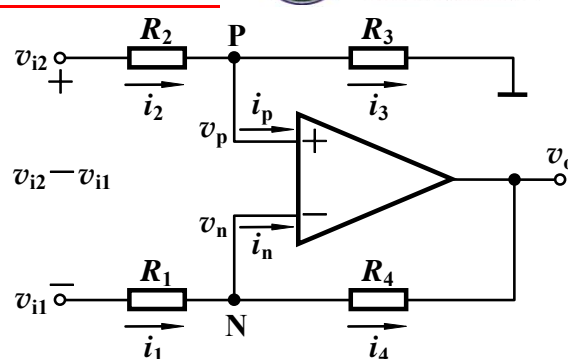
$$\text{当 } \frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}, \text{ 则 } v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$$

若继续有 $R_4 = R_1$, 则 $v_o = v_{i2} - v_{i1}$

减法电路

优点：有效抑制共模干扰。

缺点：输入电阻低。



7.1 基本运算电路

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 加减法运算电路

1. 同向加法运算

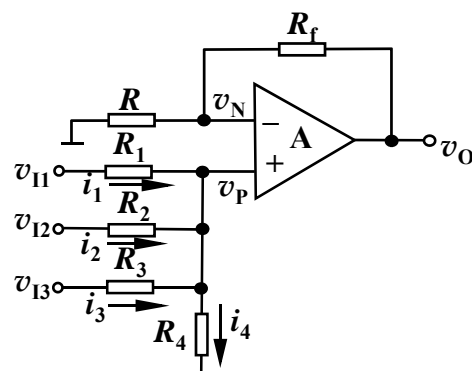
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) v_p \quad i_1 + i_2 + i_3 = i_4 \quad \text{虚断}$$

$$\frac{v_{i1} - v_p}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_p}{R_2} + \frac{v_{i3} - v_p}{R_3} = \frac{v_p}{R_4}$$

$$v_p = R_p \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \frac{v_{i3}}{R_3} \right) \quad R_p = R_1 // R_2 // R_3 // R_4$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) R_p \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \frac{v_{i3}}{R_3} \right) = R_f \cdot \frac{R_p}{R_N} \cdot \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \frac{v_{i3}}{R_3} \right)$$

$$\text{若 } R_N = R_p, \text{ 则有 } v_o = R_f \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \frac{v_{i3}}{R_3} \right)$$



同相加法运算电路

$$R_N = R // R_f$$

缺点: 各信号源互不独立。

7.1 基本运算电路

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

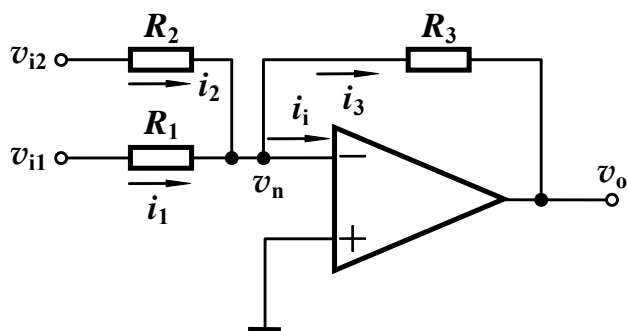
➤ 加减法运算电路

2. 反向加法运算

根据虚短、虚断和N点的KCL得:

$$\begin{cases} v_n = v_p = 0 \\ \frac{v_{i1} - v_n}{R_1} + \frac{v_{i2} - v_n}{R_2} = \frac{v_n - v_o}{R_3} \end{cases}$$

$$\Rightarrow -v_o = \frac{R_3}{R_1} v_{i1} + \frac{R_3}{R_2} v_{i2} \quad \text{若 } R_1 = R_2 = R_3 \text{ 则有 } -v_o = v_{i1} + v_{i2}$$



7.1 基本运算电路

11

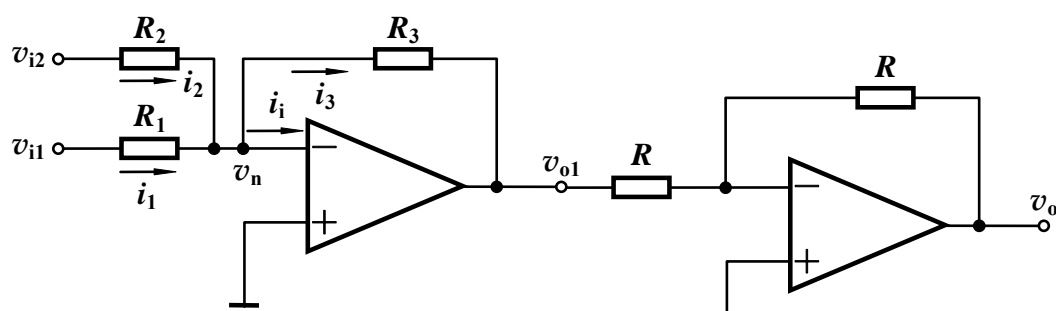


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 加减法运算电路

2. 反向加法运算

输出再接一级反相电路 可得 $v_o = v_{i1} + v_{i2}$



7.1 基本运算电路

12



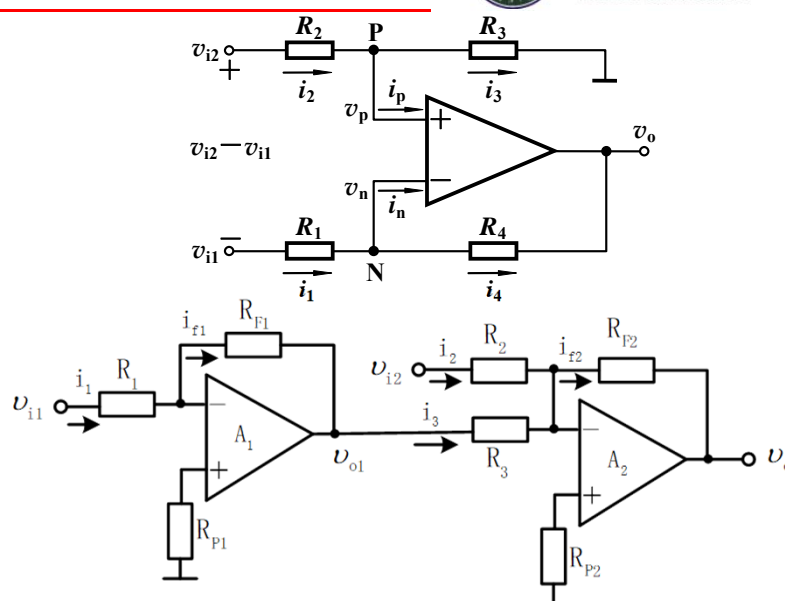
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 加减法运算电路

3. 减法运算

另一种实现方法：

一个输入信号经过反相放大器后，由同相端加入，另外一输入信号直接接入到同相端，即加上一个“负”信号。



7.1 基本运算电路

13



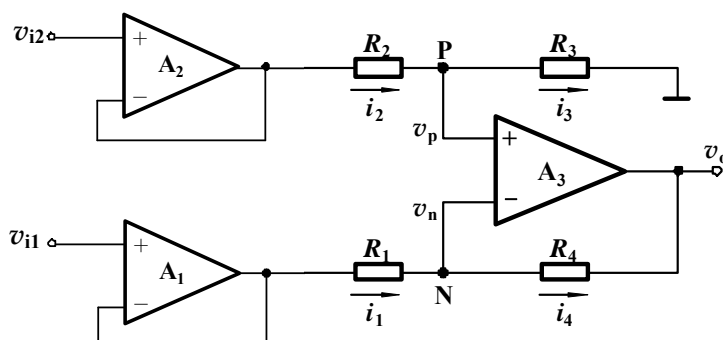
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 加减法运算电路

3. 仪表放大器

如何提高输入电阻？

如何简便的提高放大倍数？



7.1 基本运算电路

14

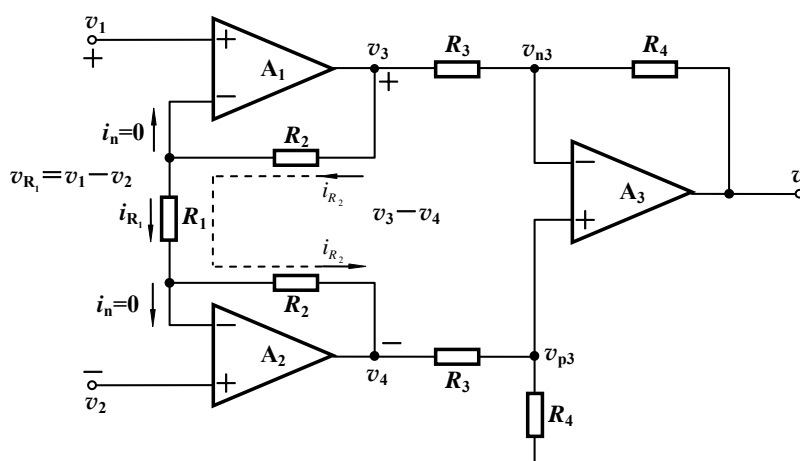


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 加减法运算电路

3. 仪表放大器

$$A_v = \frac{v_o}{v_1 - v_2} = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right)$$



通常 R_1 放在芯片外，其他电阻集成在芯片内，调节 R_1 就可以改变放大器的放大倍数。

7.1 基本运算电路

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 积分微分运算电路

1. 积分运算电路

根据“虚短”，得 $v_n = v_p = 0$

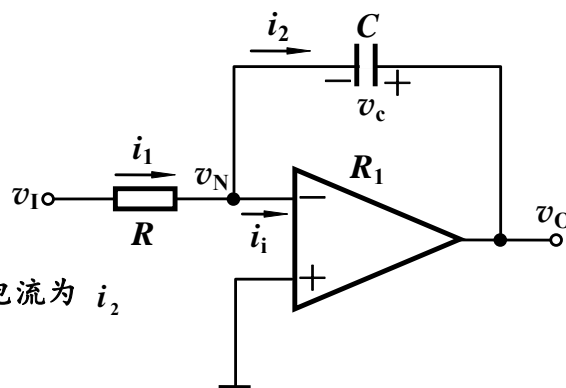
根据“虚断”，得 $i_i = 0$

因此 $i_2 = i_1 = \frac{v_i}{R}$ 电容器被充电，其充电电流为 i_2

设电容器 C 的初始电压为零，则

$$v_n - v_o = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \int \frac{v_i}{R} dt \quad \Rightarrow \quad v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$

式中，负号表示 v_o 与 v_i 在相位上是相反的。



7.1 基本运算电路

16



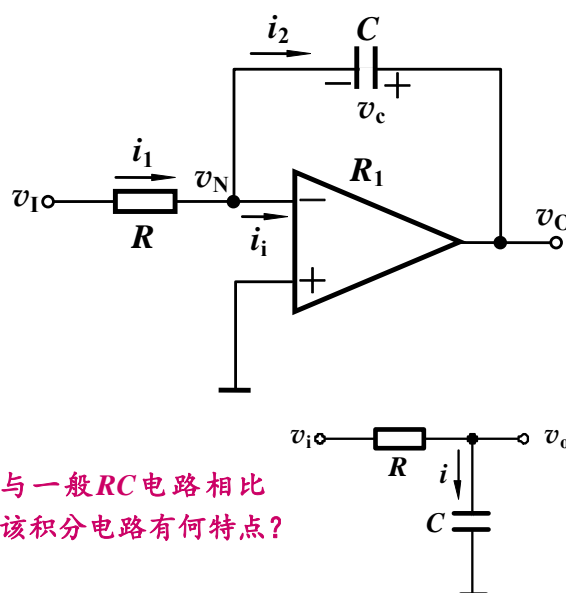
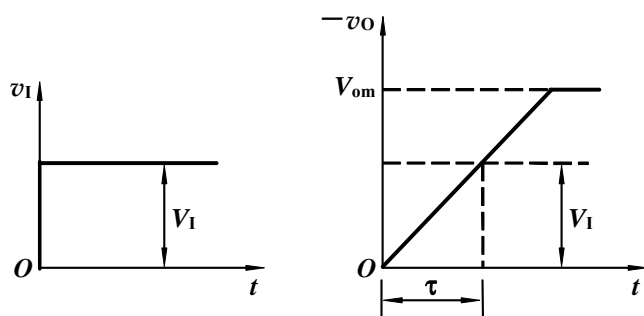
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 积分微分运算电路

1. 积分运算电路

当 v_i 为阶跃电压时，有

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt = -\frac{V_i}{RC} t = -\frac{V_i}{\tau} t$$



与一般RC电路相比
该积分电路有何特点？

7.1 基本运算电路

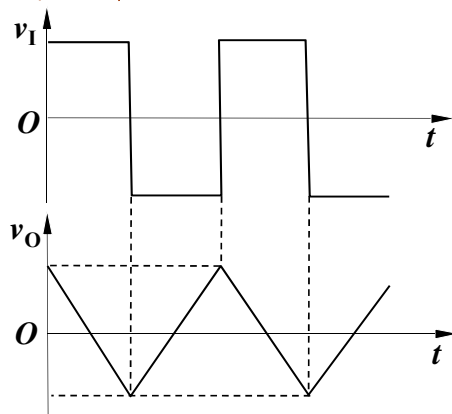
17



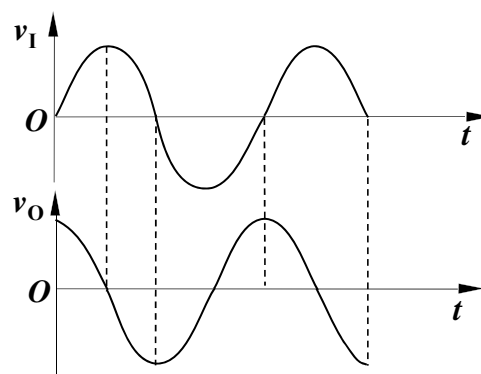
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 积分微分运算电路

1. 积分运算电路



输入为方波信号时的输出波形



输入为正弦波波信号时的输出波形

7.1 基本运算电路

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 积分微分运算电路

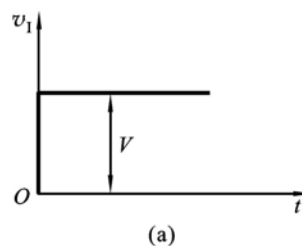
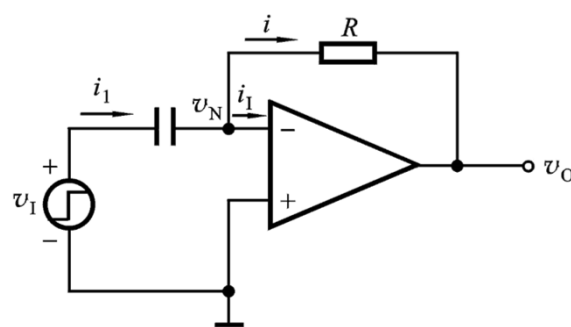
2. 微分运算电路

根据“虚短、虚断”，得

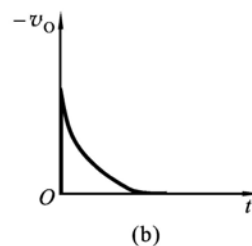
$$v_N = v_P = 0$$

$$\frac{0 - v_O}{R} = i_R = i_C = C \frac{dv_C}{dt} = C \frac{dv_i}{dt}$$

$$v_O = -RC \frac{dv_i}{dt}$$



(a)



(b)

7.1 基本运算电路

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 对数反对数运算电路

1. 对数运算电路

设 $v_i > 0$, D 导通, 则有

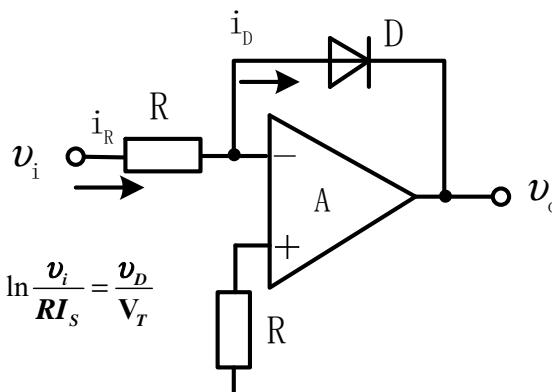
$$v_D = -v_o \quad i_D = i_R = \frac{v_i}{R}$$

$$i_D = I_s (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1) \approx I_s e^{\frac{v_D}{V_T}} \Rightarrow \frac{v_i}{R} = I_s e^{\frac{v_D}{V_T}} \Rightarrow \ln \frac{v_i}{RI_s} = \frac{v_D}{V_T}$$

$$v_o = -v_D = -V_T \ln \frac{v_i}{RI_s}$$

缺点:

- (1) 大电流时, 伏安特性与 PN 结方程差别大, 故上式只在小电流时成立。
- (2) 小信号时 $e^{\frac{v_D}{V_T}}$ 与 1 接近, 因而误差大。
- (3) 因 V_T 和 I_s 是温度的函数, 故运算精度受温度的影响。



7.1 基本运算电路

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 对数反对数运算电路

1. 对数运算电路

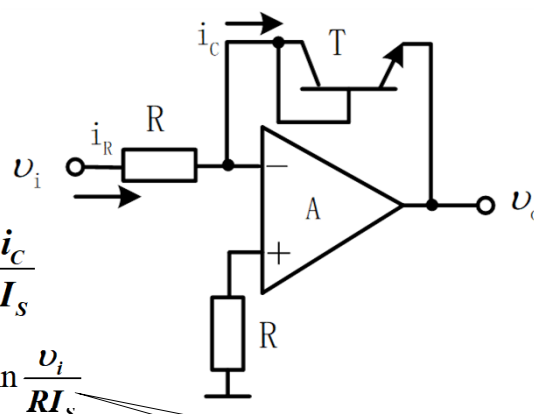
以三极管代替二极管, 以获得较大的工作范围。

$$v_{BE} \gg 26\text{mV 时}$$

$$i_C \approx I_E = I_s (e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1) \approx I_s e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \rightarrow v_{BE} = V_T \ln \frac{i_C}{I_s}$$

$$\text{而 } v_o = -v_{BE} \quad i_C = i_1 = \frac{v_i}{R} \Rightarrow v_o = -V_T \ln \frac{v_i}{RI_s}$$

注意: v_i 必须大于零, 电路的输出电压小于 0.7 伏



I_s 受温度影响较大

7.1 基本运算电路

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 对数反对数运算电路

1. 对数运算电路

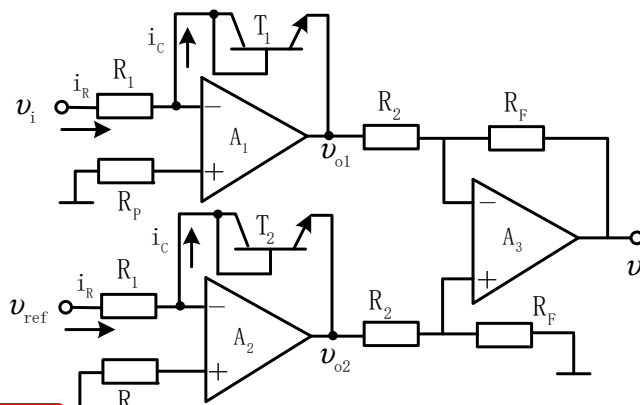
T_1 与 T_2 , A_1 与 A_2 是对称的, 在 $v_i > 0$ 时

$$v_{o2} = -V_T \ln \frac{v_R}{R I_S} \quad v_{o1} = -V_T \ln \frac{v_i}{R I_S}$$

$$v_o = \frac{R_f}{R_2} (v_{o1} - v_{o2}) = \frac{R_f}{R_2} V_T \ln \frac{v_i}{v_R}$$

V_T 的影响如何消除? R_2 采用温敏电阻抵消

在理想对称的条件下, 可以消除因 I_S 受温度的影响产生的误差。



7.1 基本运算电路

22

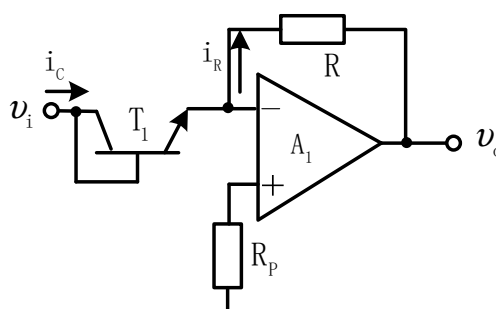


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 对数反对数运算电路

2. 指数运算电路

$$v_o = -R I_S e^{\frac{v_i}{V_T}}$$



注意: 为了使晶体管导通, 输入电压应当大于0, 且只能在发射结导通的范围内, 故输入电压的动态范围很小, 同样, 输出的运算结果受温度和 I_S 的影响。

7.1 基本运算电路

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 乘除运算电路

思路：

- 1、利用对数运算将乘法和除法运算转化为对数的加法和减法运算
- 2、再进行反对数运算，实现乘除运算

