

# 第九章 电流模式电路

## 9.1 电流模式电路的基本概念

## 9.2 跨导线性环

## 9.3 电流传输器

## 9.4 跨导运算放大器

## 9.5 电流反馈型集成运算放大器

# 9.1 电流模式电路的基本概念

## 9.1.1 概述

## 9.1.2 电流模式电路的特点

# 9.1.1 概述

一种新型电子电路—电流模式电路正在快速发展。电流模式电路在速度、带宽、动态范围等方面具有优良的性能。

用电流模式电路实现的电压放大器，在电流模式领域，可以突破增益带宽积为常数的限制，而且使增益带宽积随闭环增益成线性增大。

在电流模式领域，多采用匹配技术，在电路结构上尽量对称，其结果是将非线性失真、线性失真以及温漂等绝大部分相互对消，使得输出信号与输入信号极大地逼近。

电流模式电路就是能够有效地传送、放大和处理电流信号的电路。在电流模式电路中，以电流作为变量分析和标定电路。

## 9.1.2 电流模式电路的特点

电流模式电路的主要性能特点有：

1. 阻抗水平不同
2. 速度高、频带宽
3. 电源电压小，功耗低
4. 非线性失真小
5. 采用跨导线性原理简化电路运算
6. 动态范围大

## 9.2 跨导线性环

跨导线性电路的主要性能是借助于双极型晶体管的跨导参数与其集电极电流成正比关系而得到的。它既适用于小信号，又适用于大信号。

### 9.2.1 跨导线性与跨导线性环

### 9.2.2 由跨导线性环构成的电流模式电路

# 1. 线性跨导原理

双极型晶体管的电流  $i_C$  与发射结电压  $u_{BE}$  的关系为：

$$i_C = I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$$

即：

$$u_{BE} = U_T \ln \frac{i_C}{I_S}$$

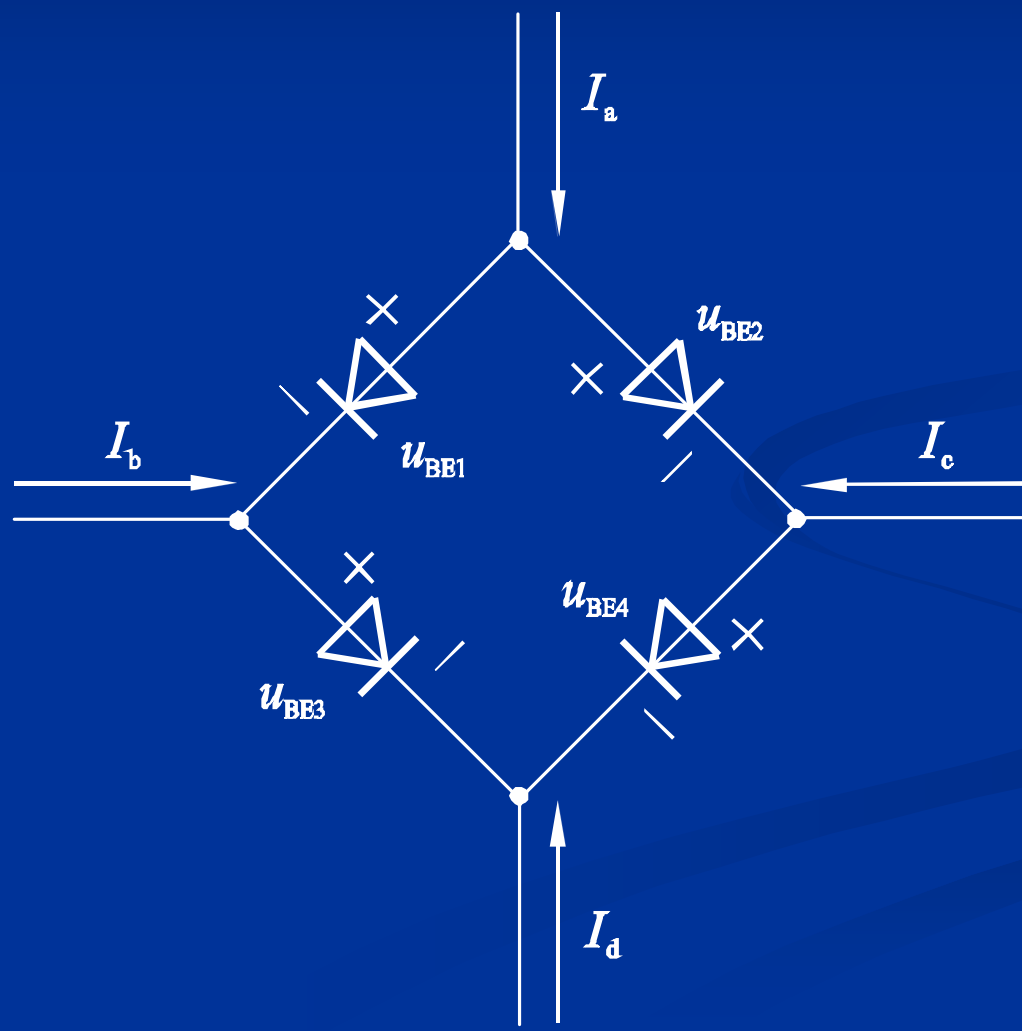
其跨导  $g_m$  定义为：

$$g_m = \left. \frac{di_C}{du_{BE}} \right|_Q = \left. \frac{I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}}{U_T} \right|_Q = \frac{I_C}{U_T}$$

**跨导线性原理**：晶体管跨导与集电极电流成线性关系。

## 2. 跨导线性环 (TL) 原理

有 $n$ 个正向偏置的发射结构成一个闭合环路。



顺时针(CW) $u_{BE}$ 数等于逆时针(CCW) $u_{BE}$ 数即 :

$$\left( \sum_{j=1}^{n/2} u_{BEj} \right)_{CW} = \left( \sum_{j=1}^{n/2} u_{BEj} \right)_{CCW}$$

即: 
$$\left( \sum_{j=1}^{n/2} U_T \ln \frac{i_{Cj}}{I_{Sj}} \right)_{CW} = \left( \sum_{j=1}^{n/2} U_T \ln \frac{i_{Cj}}{I_{Sj}} \right)_{CCW}$$

则: 
$$\left( \prod_{j=1}^{n/2} \frac{i_{Cj}}{I_{Sj}} \right)_{CW} = \left( \prod_{j=1}^{n/2} \frac{i_{Cj}}{I_{Sj}} \right)_{CCW}$$



因为反向饱和电流  $I_{Sj}$  等于发射区面积  $A_j$  与饱和电流密度  $J_{Sj}$  的乘积：
$$I_{Sj} = A_j J_{Sj}$$

所以：
$$\left( \prod_{j=1}^{n/2} \frac{i_{Cj}}{A_j} \right)_{CW} = \left( \prod_{j=1}^{n/2} \frac{i_{Cj}}{A_j} \right)_{CCW}$$

从而得到一个简洁的关系式：

$$\left( \prod_{j=1}^{n/2} J_{Cj} \right)_{CW} = \left( \prod_{j=1}^{n/2} J_{Cj} \right)_{CCW}$$

从而，跨导线性环原理：在含有偶数个正偏发射结、且顺时针方向结的数目与逆时针方向结的数目相等的闭环回路中，顺时针方向发射极电流密度之积等于逆时针方向发射极电流密度之积。

上式可改写为:

$$\prod_{CW} \frac{1}{A_j} \prod_{CW} i_{Cj} = \prod_{CCW} \frac{1}{A_j} \prod_{CCW} i_{Cj}$$

引入面积比系数  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\prod_{CW} A_j}{\prod_{CCW} A_j}$$

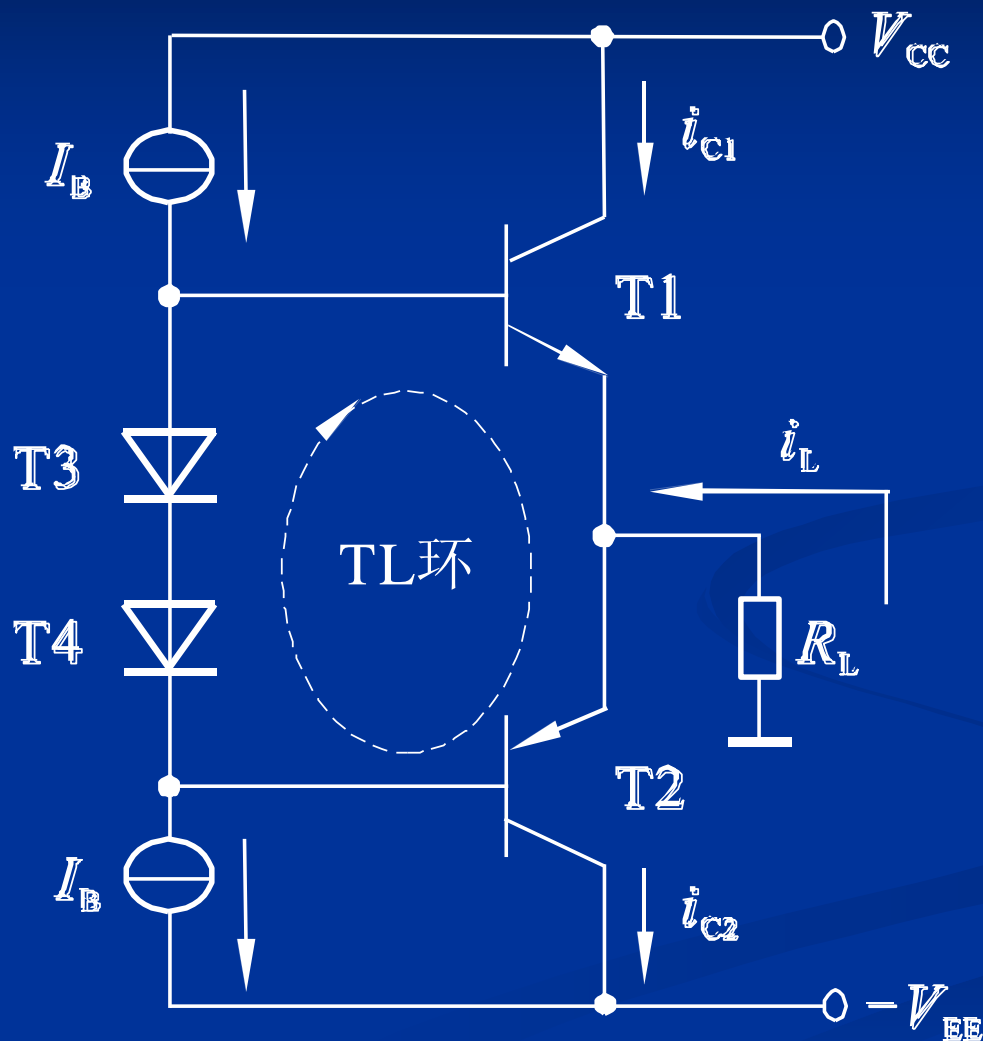
则有: 
$$\prod_{CW} i_{Cj} = \lambda \prod_{CCW} i_{Cj}$$

利用上式可实现跨导线性环的电流比例运算。

跨导线性电路完全工作在电流量域, 是一种真正的电流模式电路, 除了变化很小的晶体管结电压之外, 它的输入变量和输出变量都是电流。

## 9.2.2 由跨导线性环构成的电流模式电路

### 1. 甲乙类互补推挽电路



设各管发射区面积相等，即  $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$ ，  
则有：
$$I_B^2 = i_{C1} \cdot i_{C2}$$

若负载电流  $i_L = 0$ ， $T_1$ 、 $T_2$  处于静态，则：

$$i_{C1} = i_{C2} = I_B$$

可见，静态工作电流等于偏置电流  $I_B$ 。

若负载电流  $i_L \neq 0$ ， $T_1$ 、 $T_2$  处于动态，则：

$$i_{C2} = i_{C1} + i_L$$

可导出：

$$i_{C2} = \frac{1}{2}i_L + I_B \left[ \left( \frac{i_L}{2I_B} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad i_{C1} = -\frac{1}{2}i_L + I_B \left[ \left( \frac{i_L}{2I_B} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

如果负载电流  $|i_L| \ll I_B$  ， 则有：

$$i_{C2} = I_B + \frac{1}{2}i_L \quad , \quad i_{C1} = I_B - \frac{1}{2}i_L$$

这说明，当负载电流很小时， $T_1$ 、 $T_2$ 管处于甲类推挽工作状态。

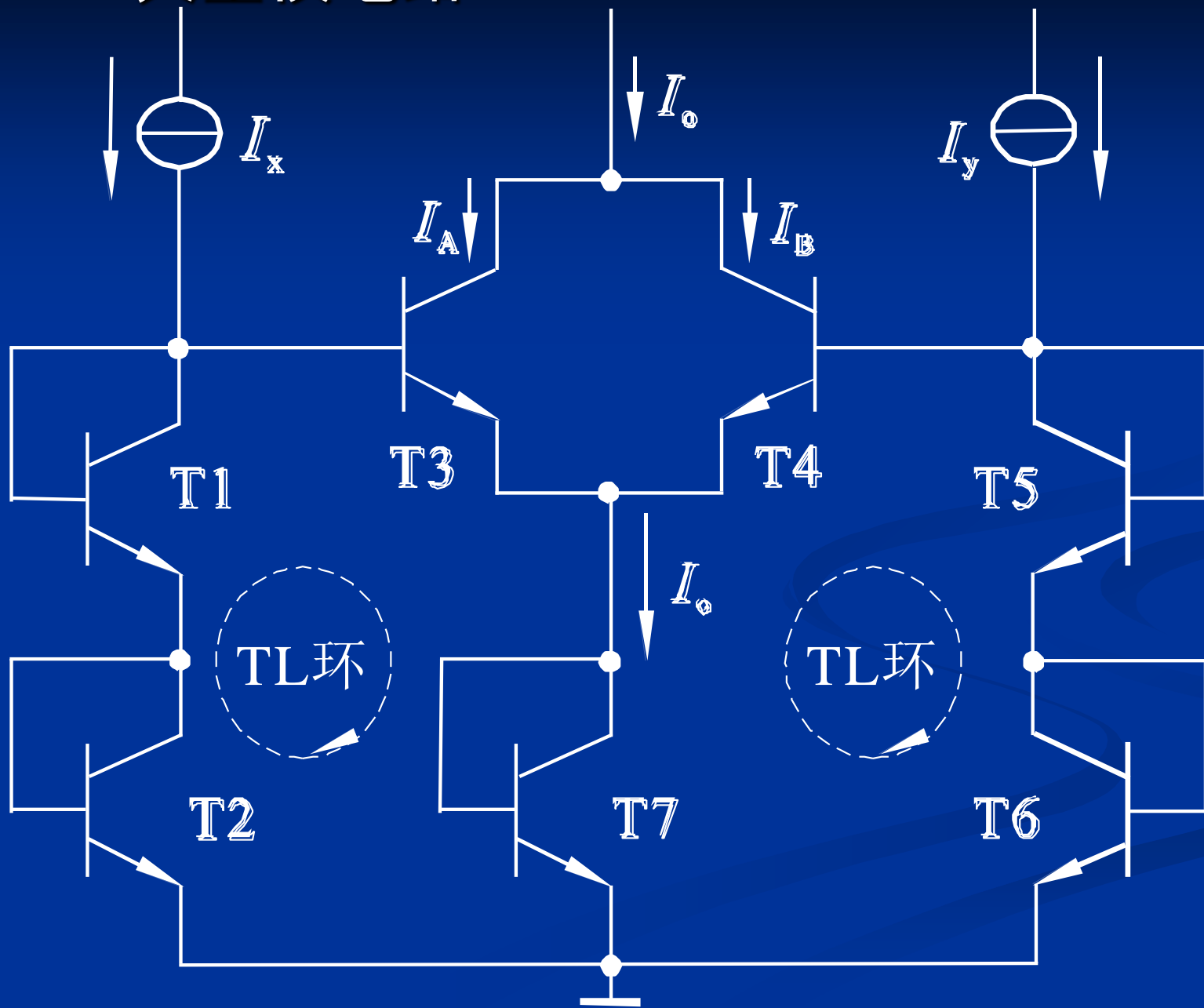
而当负载电流  $|i_L| \gg I_B$ 时，则：

$$i_{C1} = 0 \quad , \quad i_{C2} = i_L$$

$$\text{或 } i_{C1} = -i_L \quad , \quad i_{C2} = 0$$

可见，此时  $T_1$ 、 $T_2$ 管分别工作在乙类状态。

## 2. 矢量模电路



应用跨导线性环原理可写出：

$$I_x^2 = I_A I_o \quad I_y^2 = I_B I_o$$

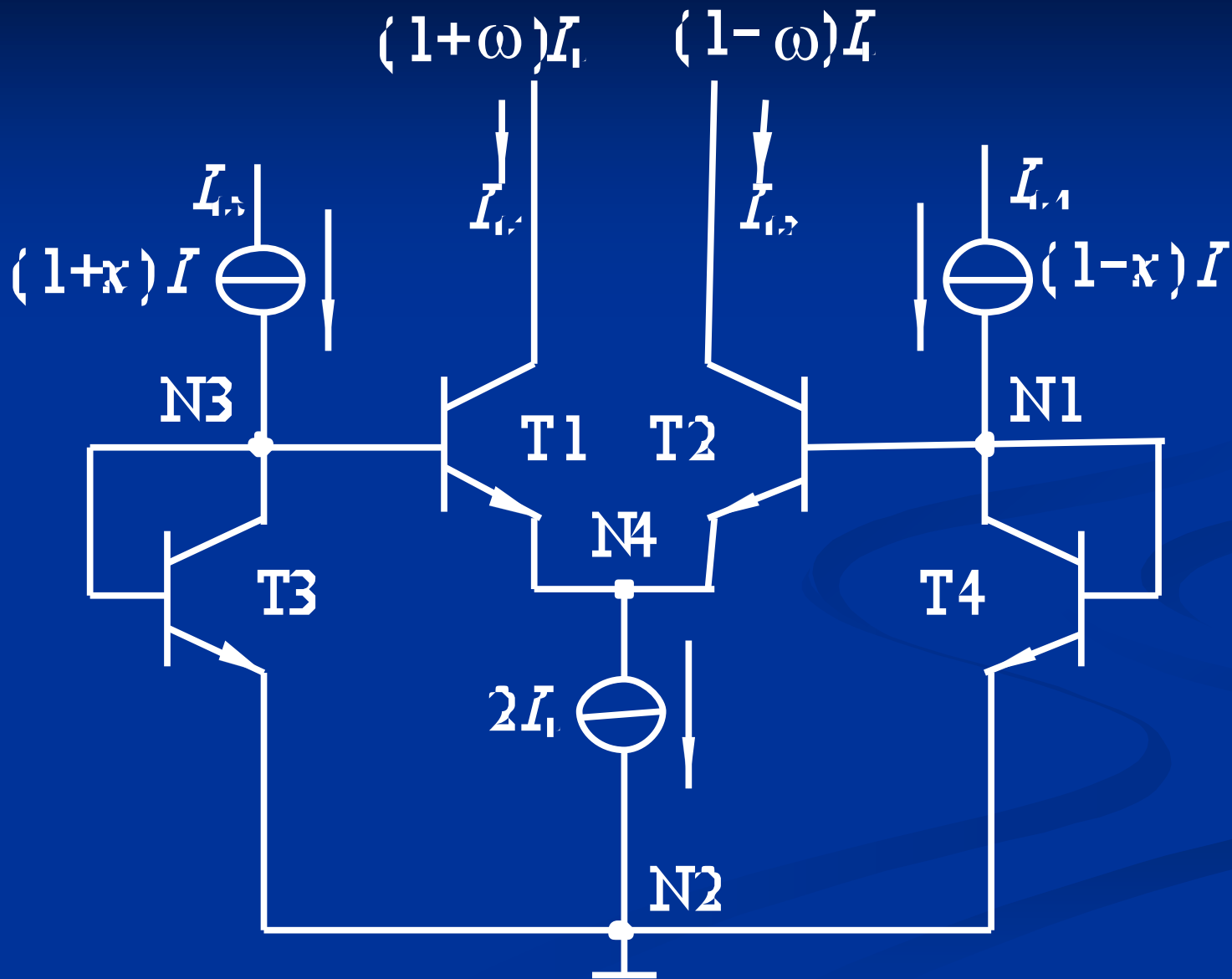
同时有： $I_A + I_B = I_o$

联立上面三式可得：

$$I_o^2 = I_x^2 + I_y^2 \quad I_o = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$$

即输出电流等于  $I_x$ 、 $I_y$  两个输入分量的矢量模。

### 3. 电流增益单元及多级电流放大器





由跨导线性环原理得到：

$$I_{C1}I_{C4} = I_{C2}I_{C3}$$

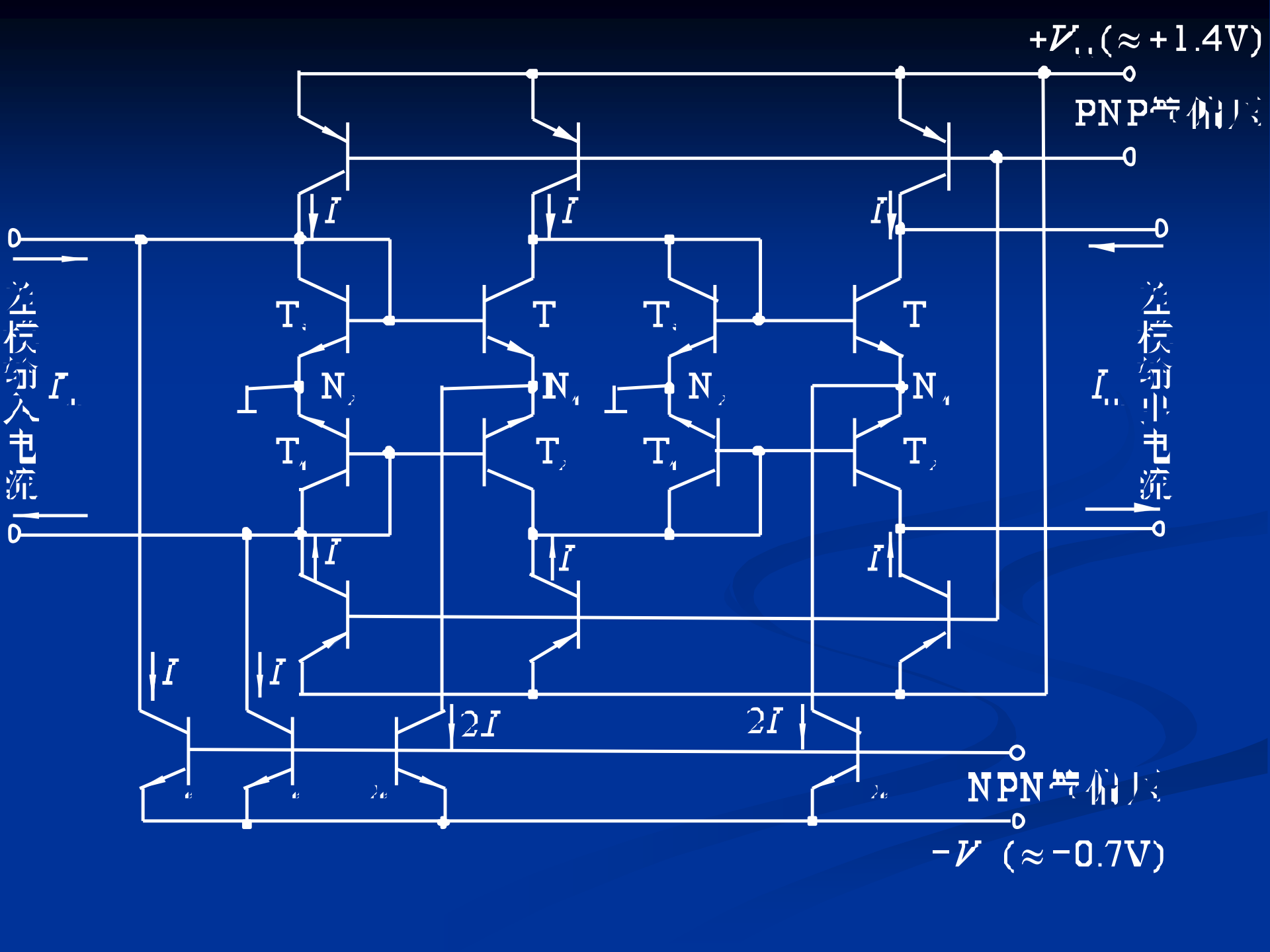
得到： $\omega \equiv x$

差模输入电流为： $I_{id} = (1+x)I - (1-x)I = 2xI$

差模输出电流为： $I_{od} = (1+\omega)I_E - (1-\omega)I_E = 2\omega I_E$

差模电流增益为：

$$A_{id} = \frac{I_{od}}{I_{id}} = \frac{I_E}{I}$$



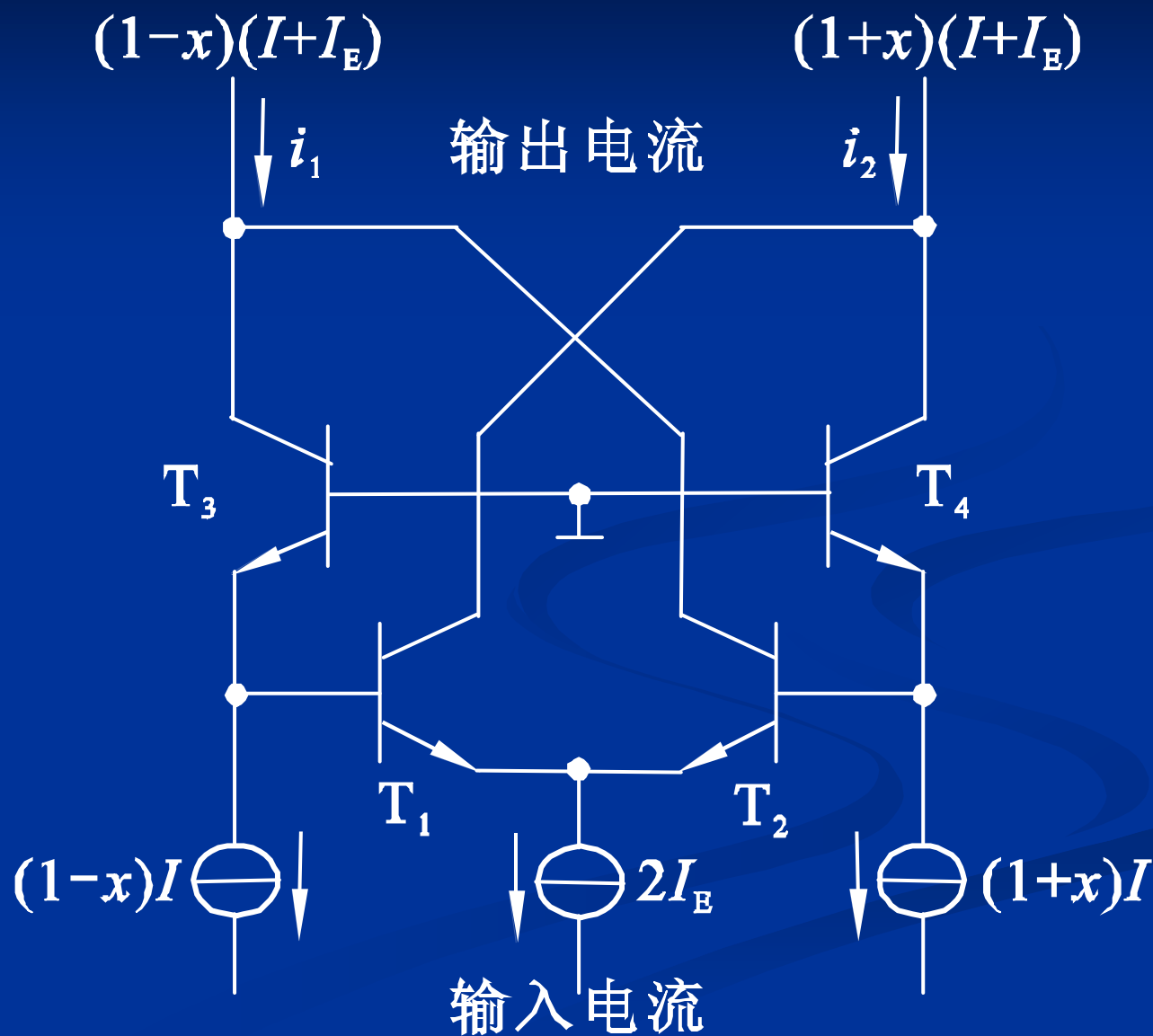
单级电流增益为：

$$A_{id} = \frac{I_E}{I - I_E}$$

n级电路的总电流增益为：

$$A_{idn} = \left( \frac{I_E}{I - I_E} \right)^n$$

# 4. 吉尔伯特 (Gilbert) 电流增益单元及多级电流放大器



输入差模电流为：

$$i_{id} = (1-x)I - (1+x)I = -2xI$$

$x$ 是输入信号的电流调制系数。

有：

$$i_{C4} \cdot i_{C2} = i_{C1} \cdot i_{C3} \quad (1+x)I \cdot i_{C2} = i_{C1} \cdot (1-x)I$$

且：

$$i_{C2} + i_{C1} = 2I_E$$

得：

$$i_{C2} = (1-x)I_E \quad , \quad i_{C1} = (1+x)I_E$$

$$i_1 = i_{C3} + i_{C2} = (1-x)(I + I_E)$$

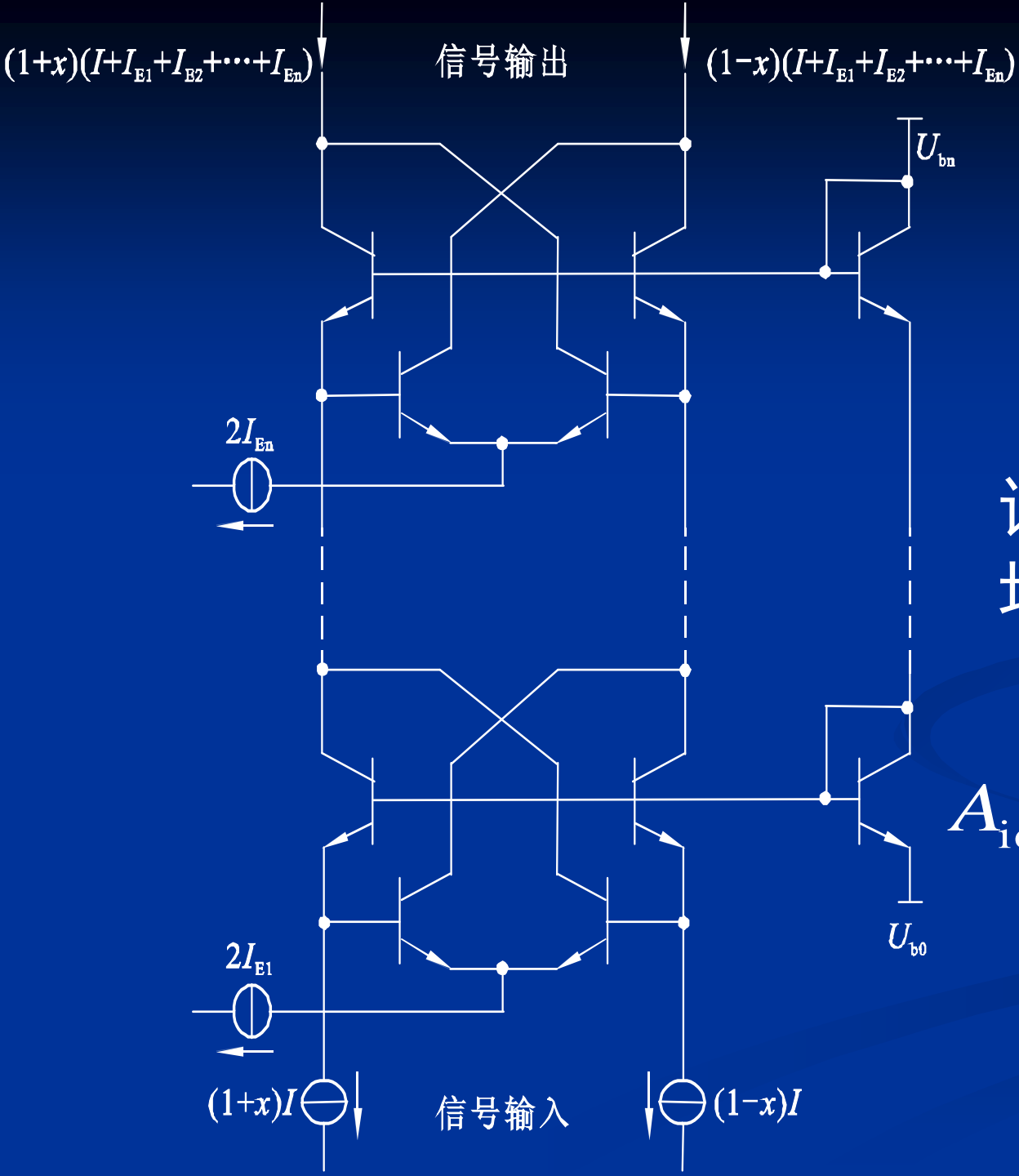
$$i_2 = i_{C4} + i_{C1} = (1+x)(I + I_E)$$

差模输出电流为：

$$i_{\text{od}} = i_1 - i_2 = -2x(I + I_{\text{E}})$$

电流增益为：

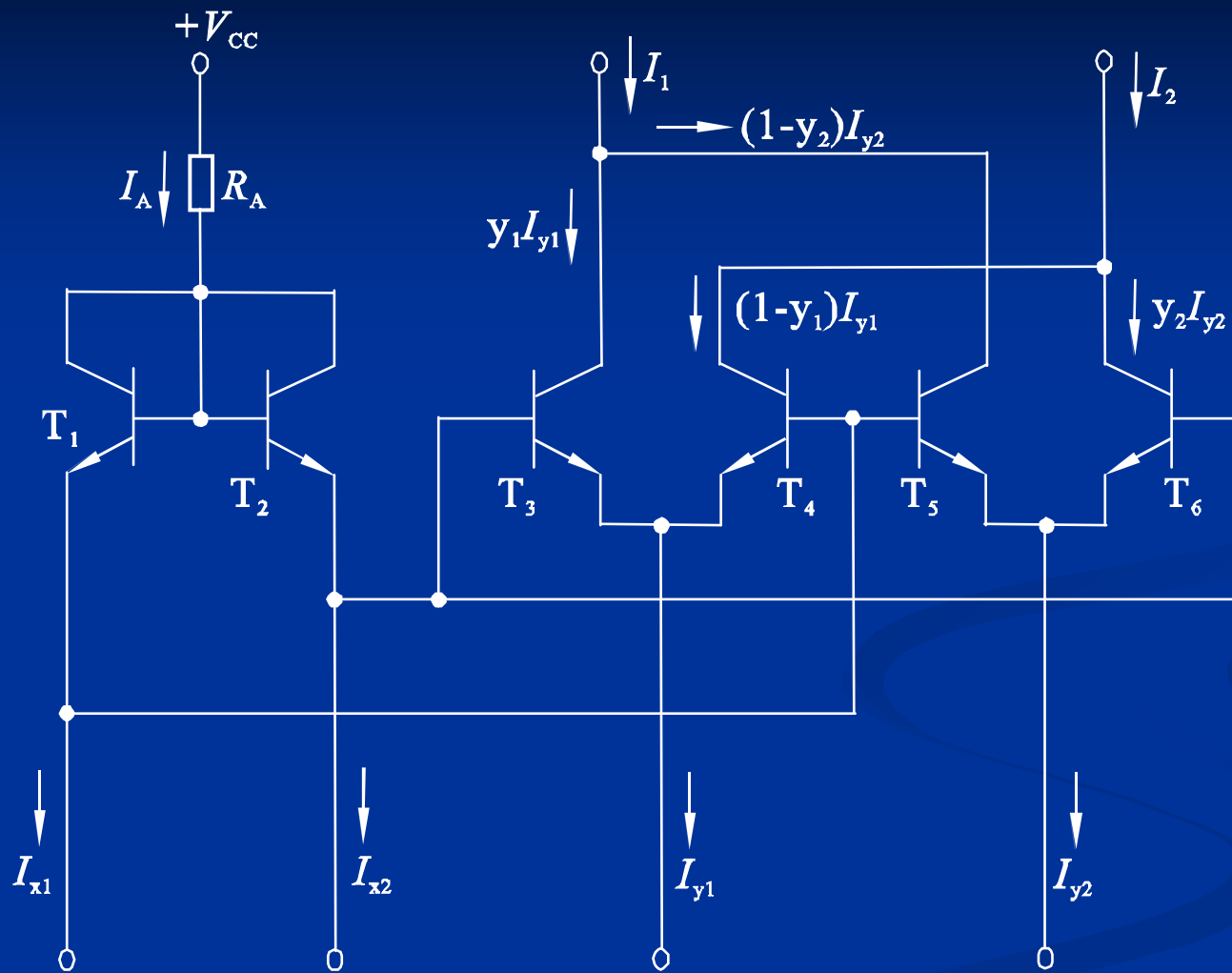
$$A_{\text{id}} = \frac{i_{\text{od}}}{i_{\text{id}}} = 1 + \frac{I_{\text{E}}}{I}$$



该电路总的电流增益：

$$\begin{aligned}
 A_{id} &= 1 + \frac{I_{E1}}{I} + \frac{I_{E2}}{I} + \dots \\
 &= 1 + \sum_{k=1}^n \frac{I_{Ek}}{I}
 \end{aligned}$$

## 5. 四象限TL乘法器





假设晶体管T1~T6是理想匹配的，发射区面积相等， $\beta$  值很大，基极电流引起的误差可以忽略。

得：

$$I_{C1} \cdot I_{C4} = I_{C2} \cdot I_{C3} \quad I_{x1} (1 - y_1) I_{y1} = I_{x2} y_1 I_{y1}$$

于是得到：

$$y_1 = \frac{I_{x1}}{I_{x1} + I_{x2}} \quad 2y_1 - 1 = \frac{I_{x1} - I_{x2}}{I_{x1} + I_{x2}}$$

电路图：  $I_A = I_{x1} + I_{x2}$

T3、T4的差模输出电流分量：

$$I_{C3} - I_{C4} = y_1 I_{y1} - (1 - y_1) I_{y1} = (2y_1 - 1) I_{y1} = \frac{I_{x1} - I_{x2}}{I_A} I_{y1}$$

同理，T1、T2、T5、T6组成的TL环路2，有：

$$I_{C1} \cdot I_{C5} = I_{C2} \cdot I_{C6} \quad I_{x1} (1 - y_2) I_{y2} = I_{x2} y_2 I_{y2}$$

于是得到：

$$y_2 = \frac{I_{x1}}{I_{x1} + I_{x2}} \quad 2y_2 - 1 = \frac{I_{x1} - I_{x2}}{I_{x1} + I_{x2}}$$

$$I_{C5} - I_{C6} = (1 - y_2) I_{y2} - y_2 I_{y2} = -(2y_2 - 1) I_{y2} = -\frac{I_{x1} - I_{x2}}{I_A} I_{y2}$$

总的差模输出电流：

$$I_o = I_1 - I_2 = (I_{C3} + I_{C5}) - (I_{C4} + I_{C6}) = (I_{C3} - I_{C4}) + (I_{C5} - I_{C6})$$

所以：

$$I_o = \frac{I_{x1} - I_{x2}}{I_A} (I_{y1} - I_{y2}) = \frac{I_x I_y}{I_A}$$

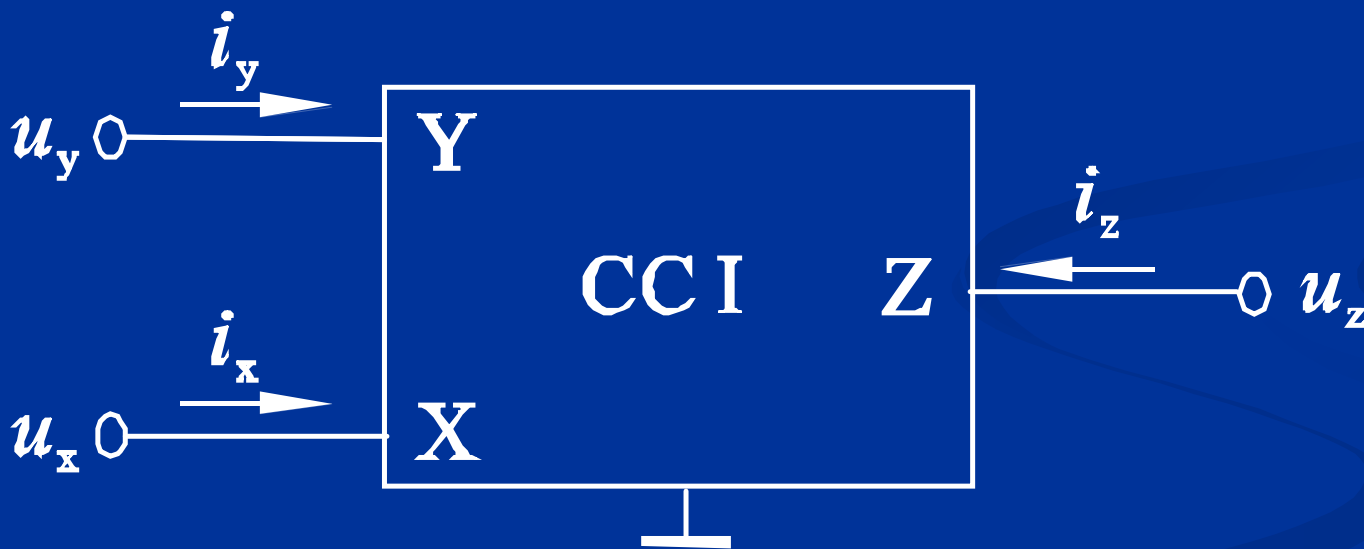
## 9.3 电流传输器

### 9.3.1 电流传输器端口特性

### 9.3.2 电流传输器的基本应用

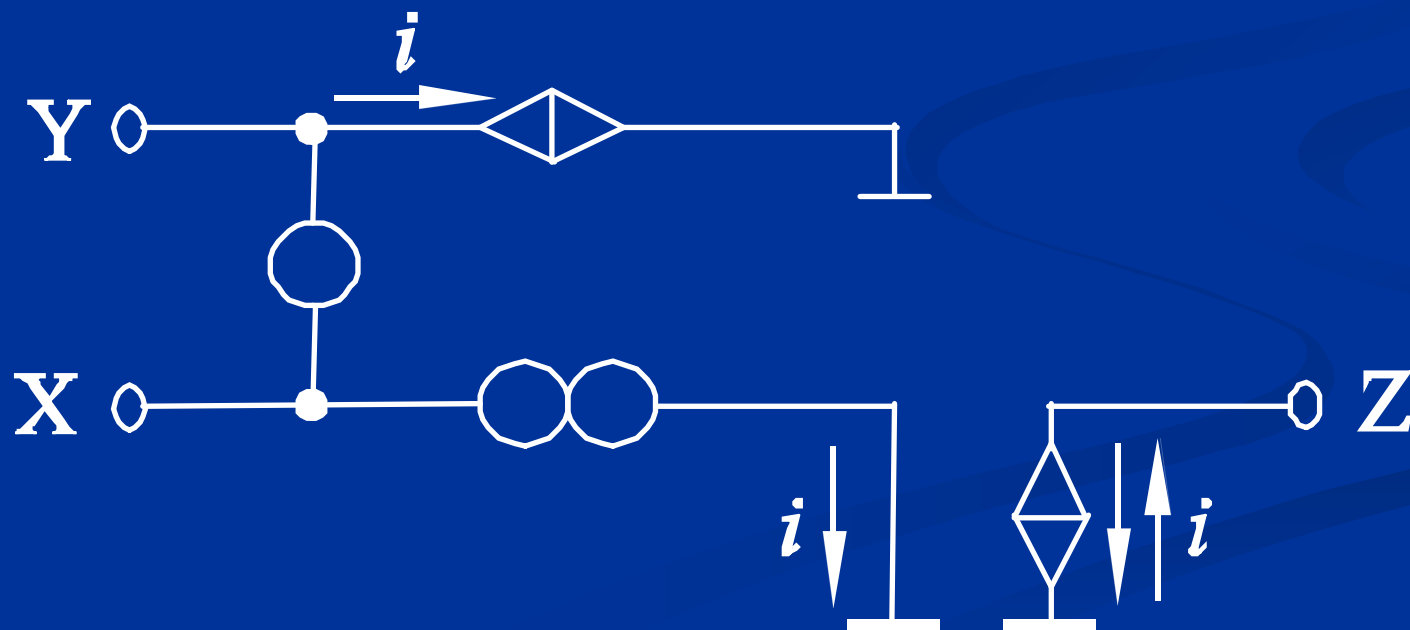
# 9.3.1 电流传输器端口特性

## 1. 第一代电流传输器 (CCI)



CC I 的输入—输出特性:

$$\begin{bmatrix} i_y \\ u_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ i_x \\ u_z \end{bmatrix}$$

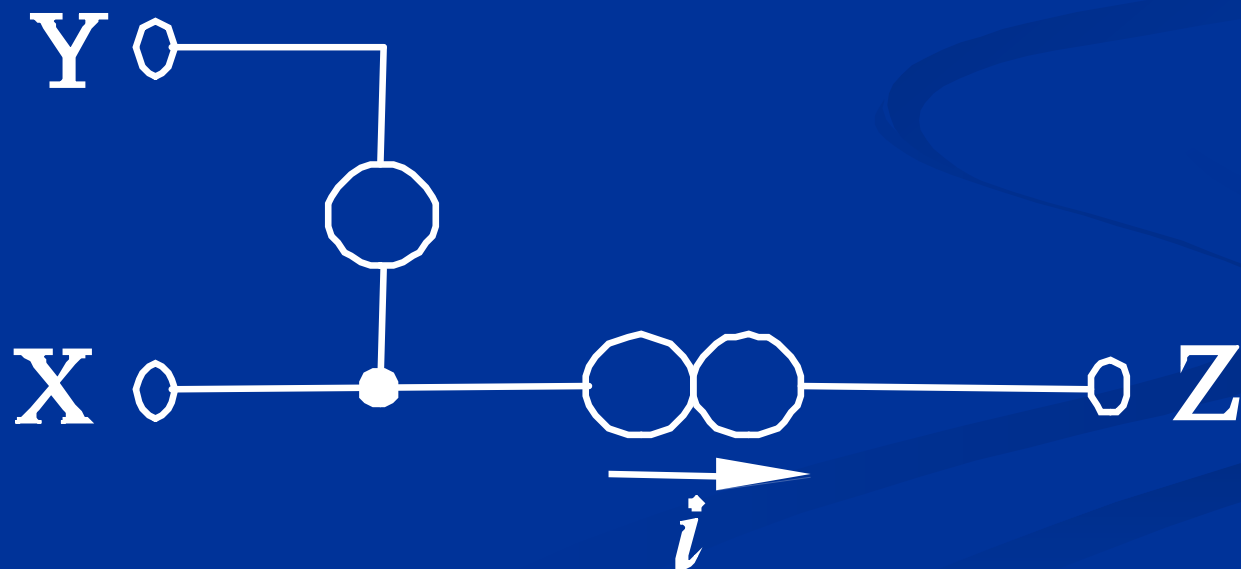
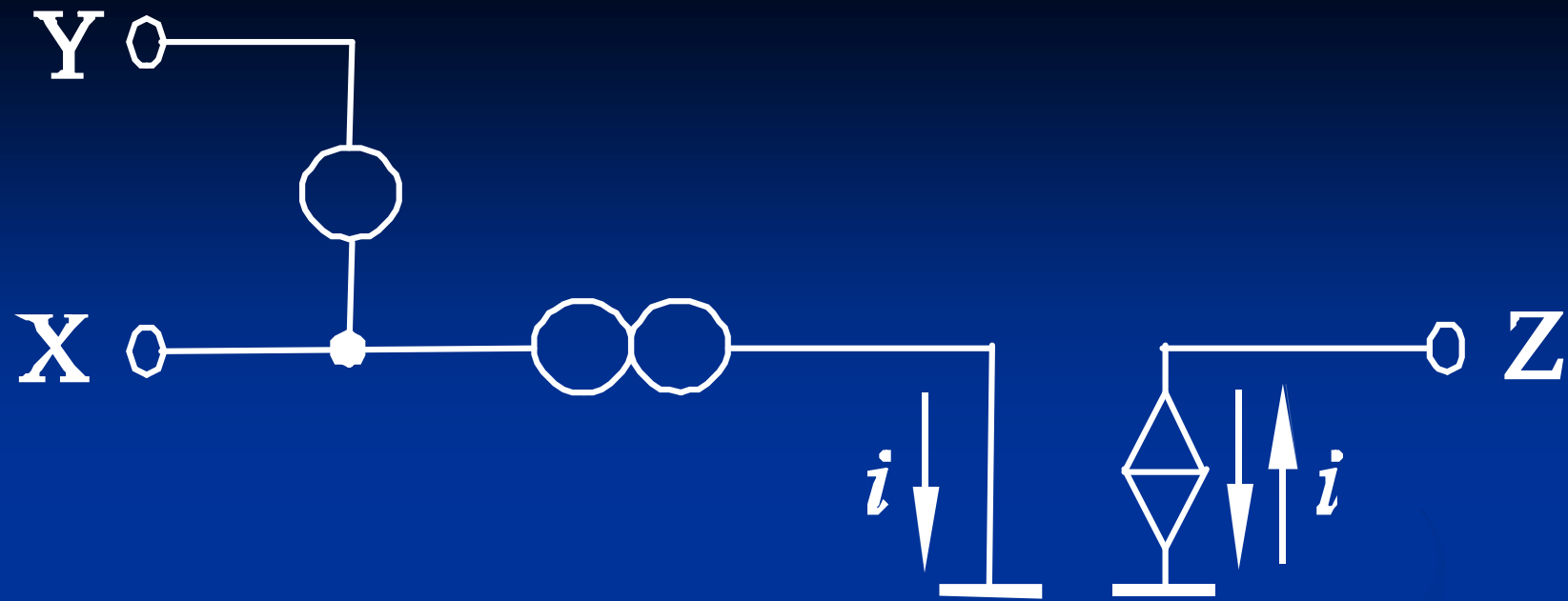


## 2. 第二代电流传输器 (CC II)



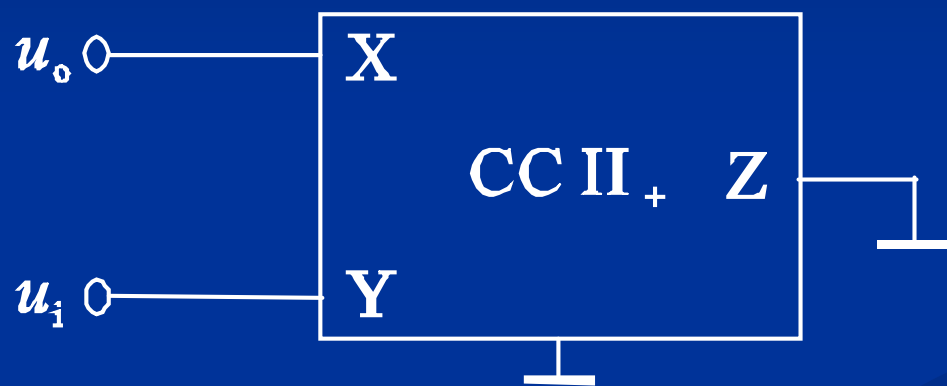
CC II 的端口特性:

$$\begin{bmatrix} i_y \\ u_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ i_x \\ u_z \end{bmatrix}$$



## 9.3.2 电流传输器的基本应用

1. 有源网络元件的模拟
  - 1) 四种受控源的模拟

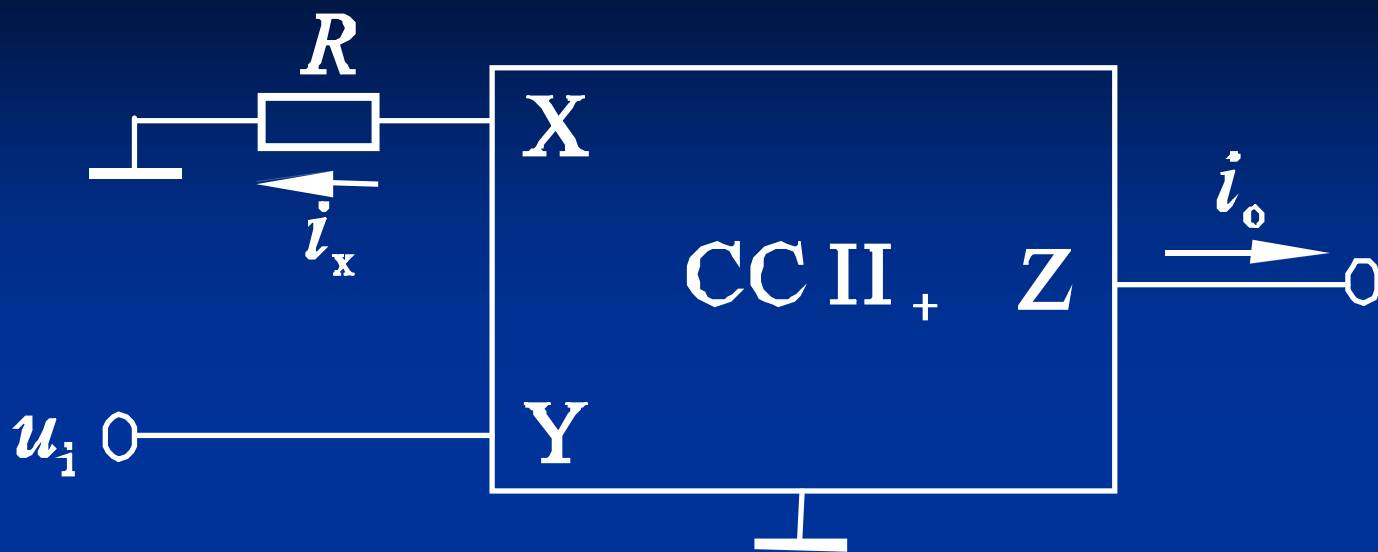


电压控制电压源，输出一输入的关系式为：

$$u_o = u_i$$

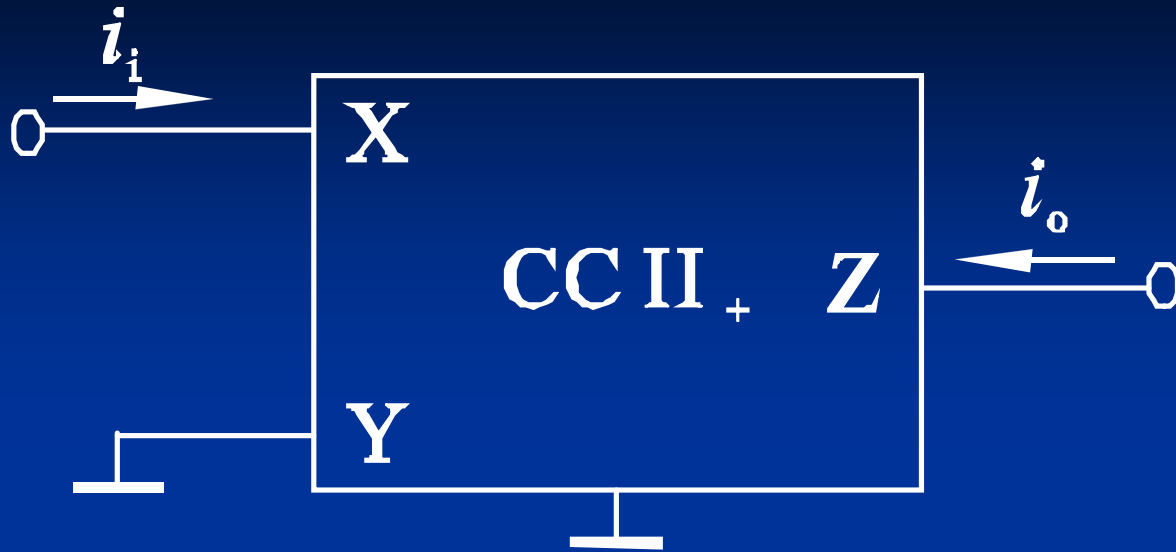


$$i_o = \frac{u_i}{R}$$



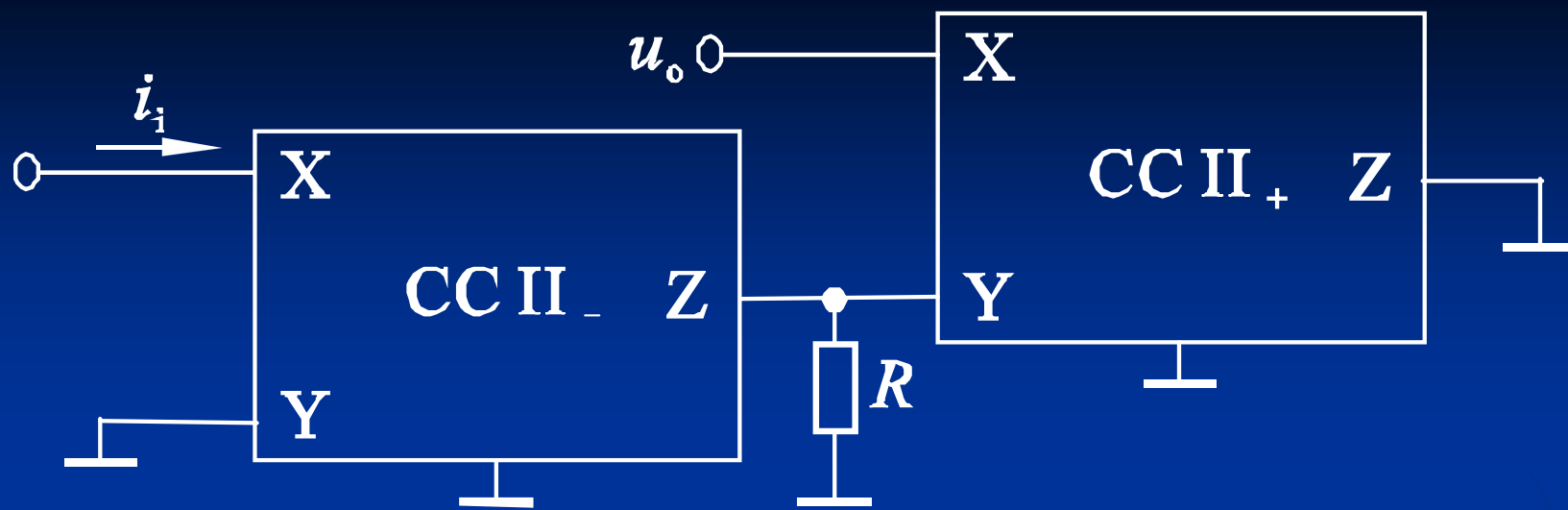
电压控制电流源，输出一输入的关系式为：

$$i_o = \frac{u_i}{R}$$



电流控制电流源，输出一输入的关系式为：

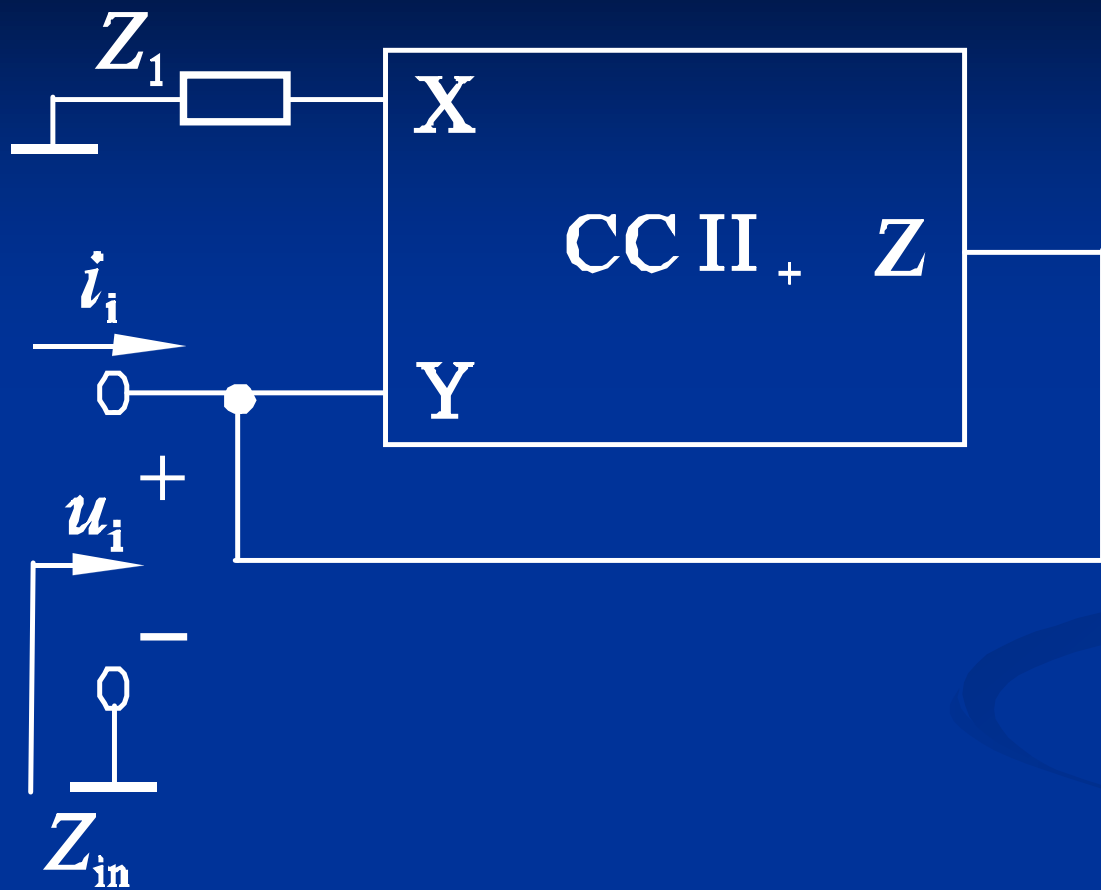
$$i_o = i_i$$



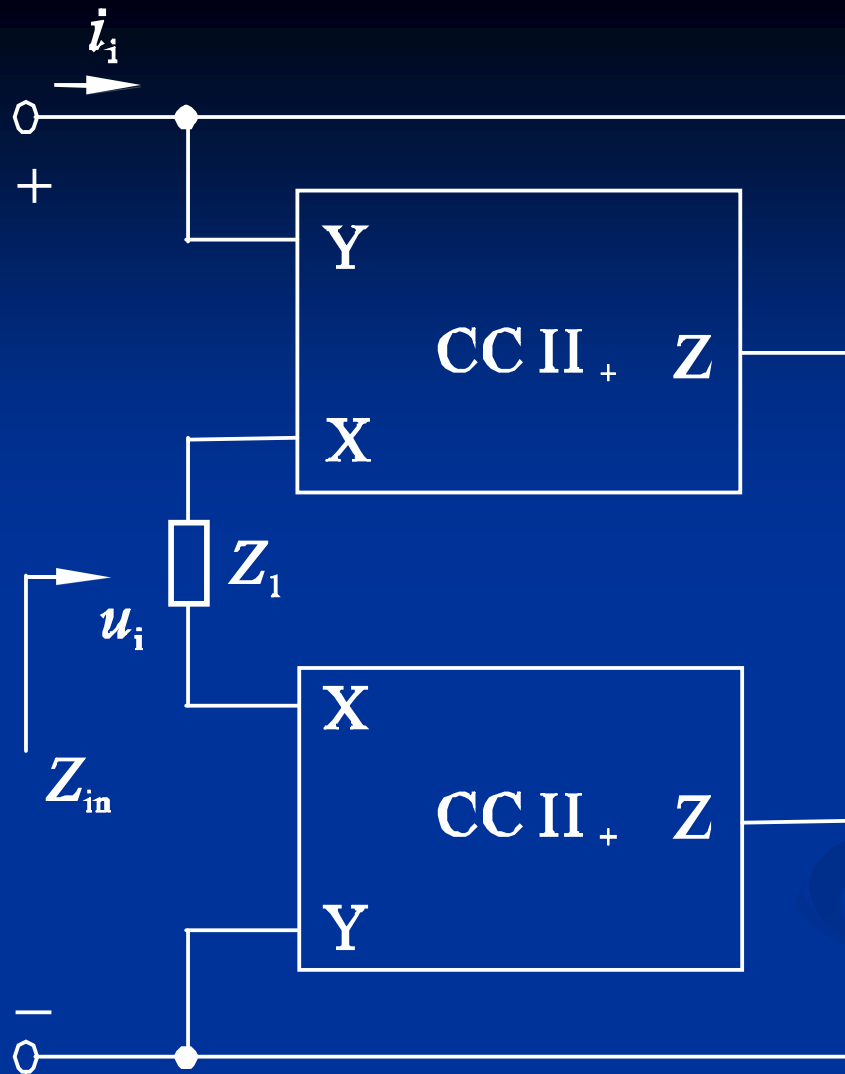
电流控制电压源，输出一输入的关系式为：

$$u_o = i_i R$$

## 2) 负阻抗变换器

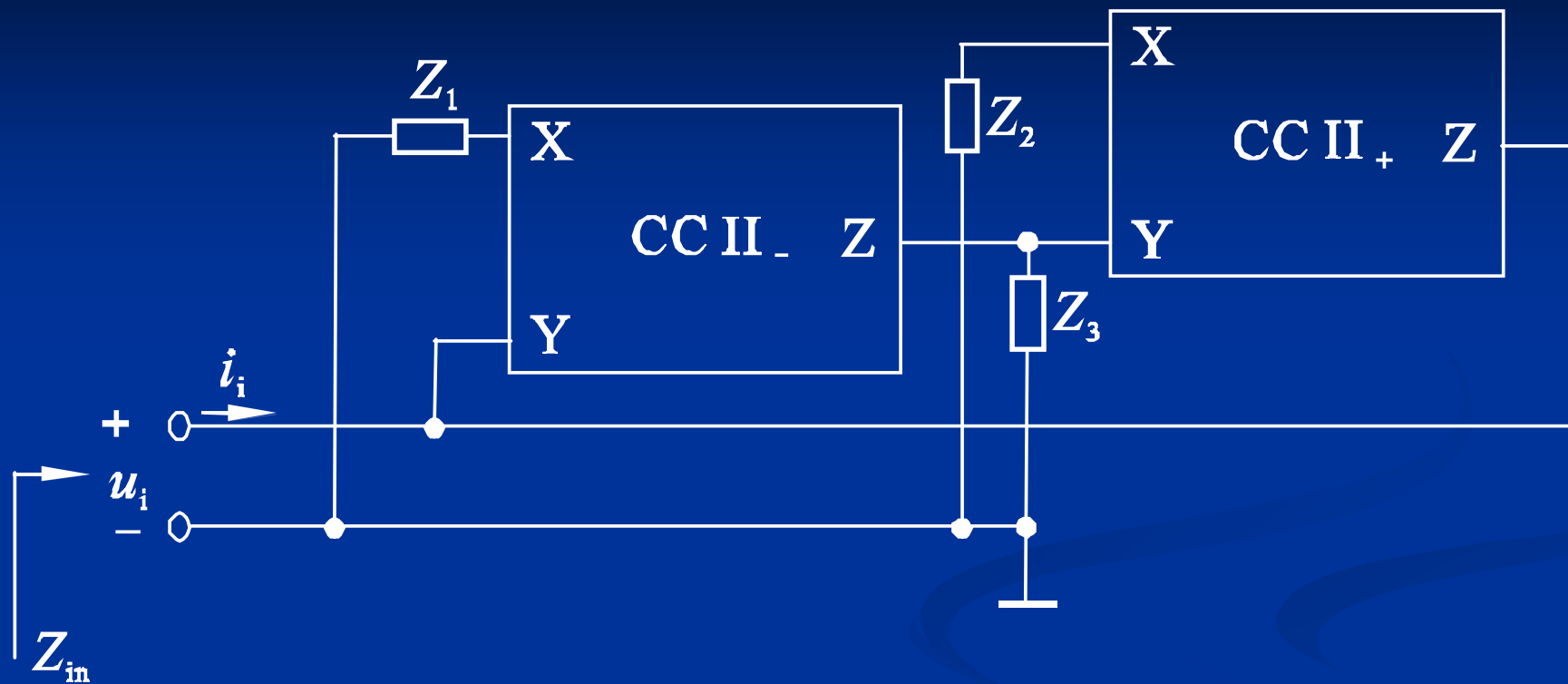


获得一个接地的负电阻：
$$Z_{in} = \frac{u_i}{i_i} = -Z_1$$



$$Z_{in} = \frac{u_i}{i_i} = -Z_1$$

### 3) 通用阻抗变换器



$$Z_{in} = \frac{u_i}{i_i} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}$$

若取  $Z_1 = R_1, Z_2 = R_2, Z_3 = 1/(j\omega C_3)$

则可得到接地模拟电感:

$$Z_{in} = j\omega R_1 R_2 C_3 = j\omega L_{eq}$$

其中  $L_{eq} = R_1 R_2 C_3$

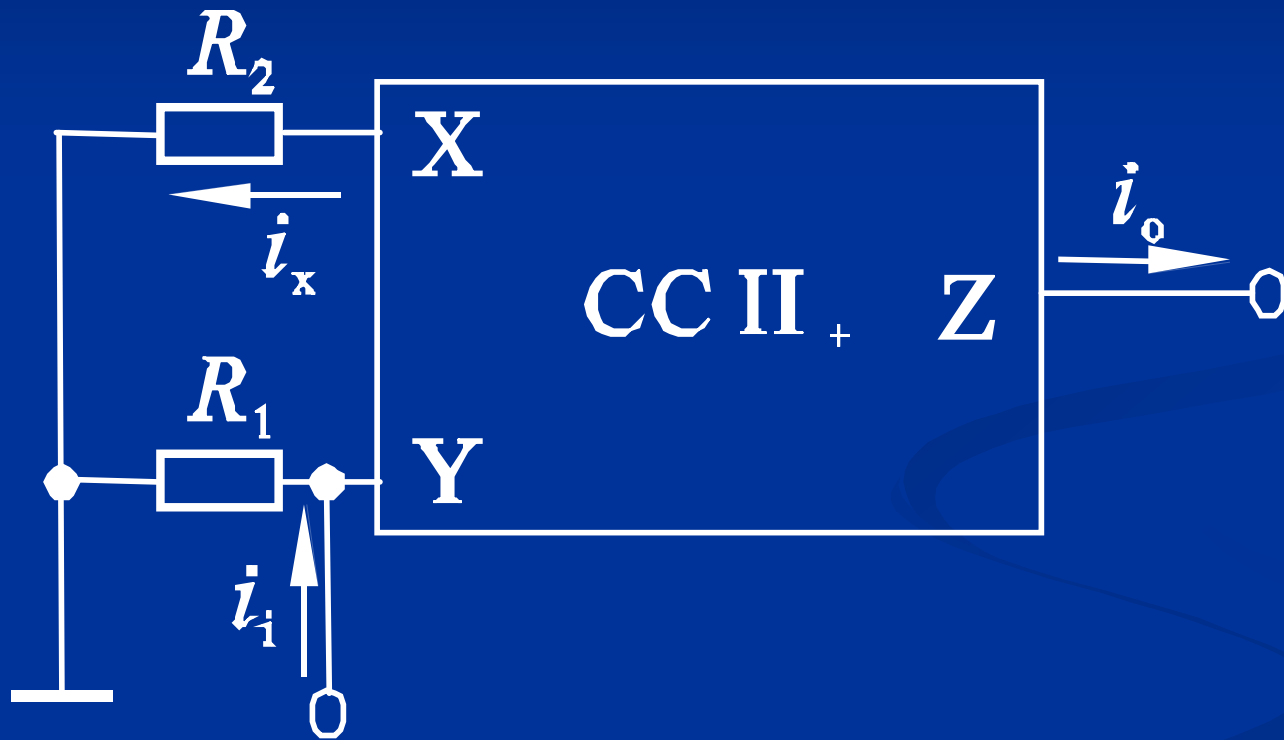
若取  $Z_1 = 1/j\omega C_1, Z_2 = 1/j\omega C_2, Z_3 = R_3,$

这时的输入阻抗为:

$$Z_{in} = \frac{-1}{\omega^2 C_1 C_2 R_3}$$

## 2. 模拟信号运算电路

### 1) 电流放大器





$$u_x = u_y = i_1 R_1$$

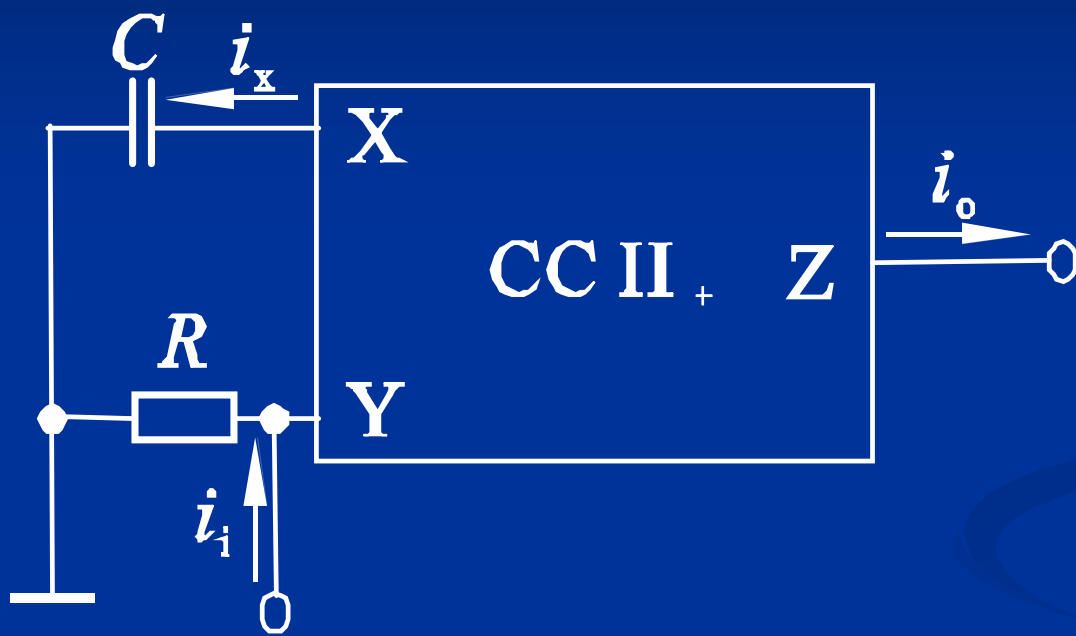
$$i_x = \frac{u_x}{R_2}$$

$$i_o = i_x$$

电流增益为：

$$A_i = \frac{i_o}{i_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

## 2) 电流微分器



$$u_y = i_1 R = u_x$$

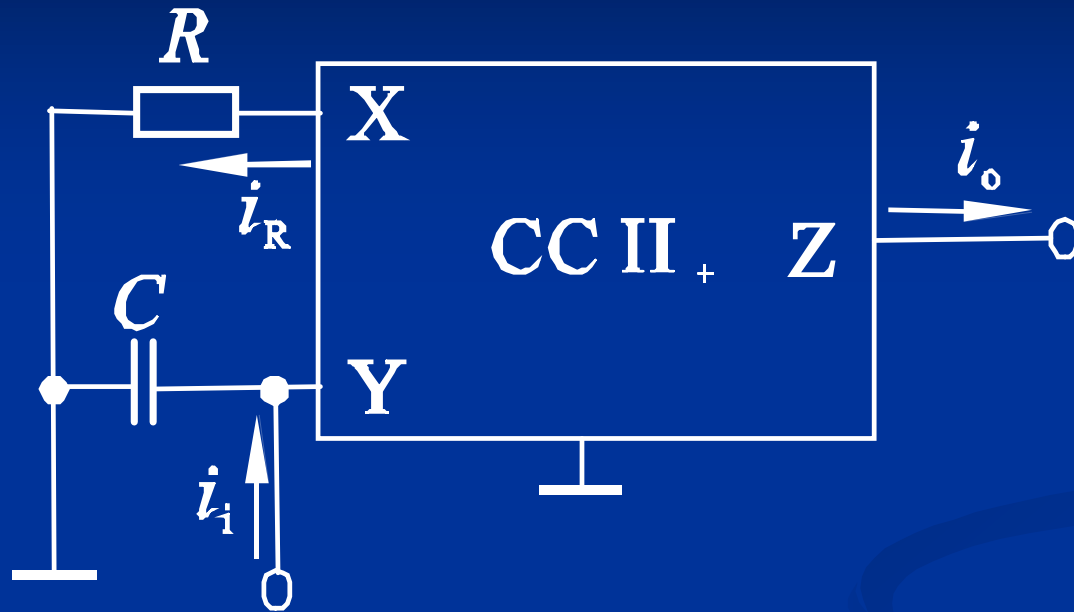
$$i_x = C \frac{du_x}{dt}$$

$$i_o = i_x$$

得：

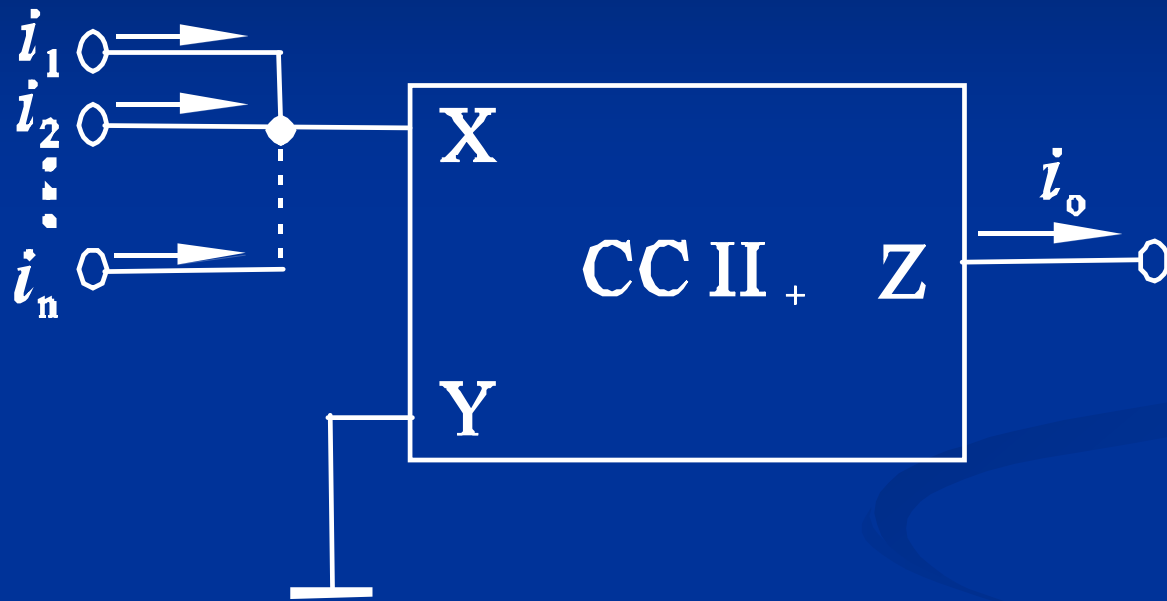
$$i_o = RC \frac{di_i}{dt}$$

### 3) 电流积分器



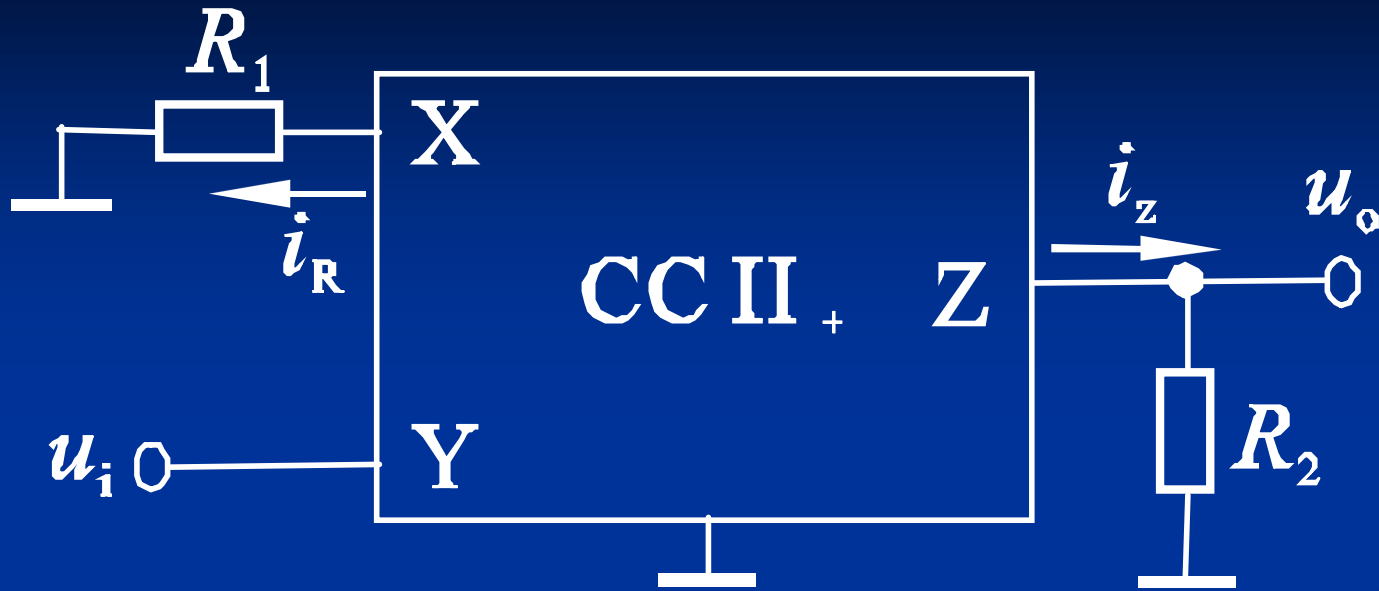
$$i_o = i_R = \frac{u_C}{R} = \frac{\frac{1}{C} \int i_i dt}{R} = \frac{1}{RC} \int i_i dt$$

## 4) 电流加法器



$$i_o = - \sum_{j=1}^n i_j$$

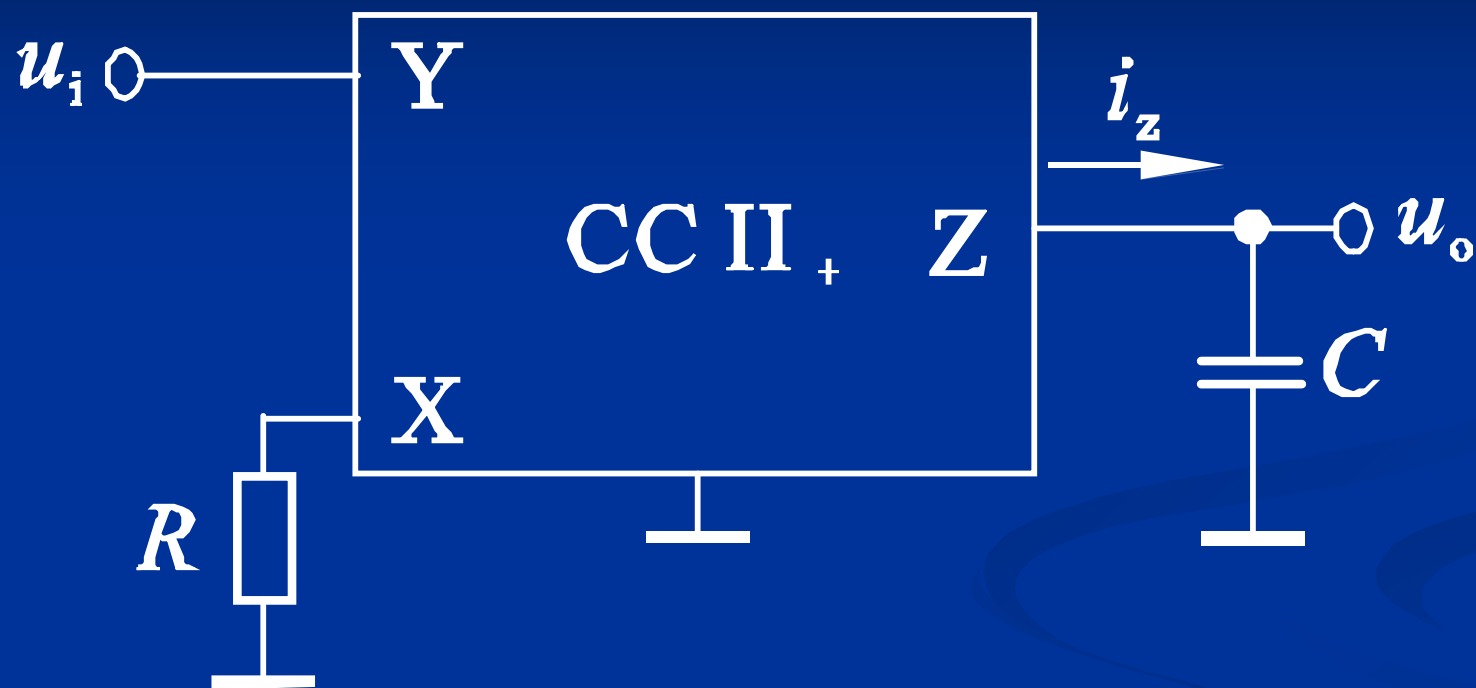
## 5) 电压放大器



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

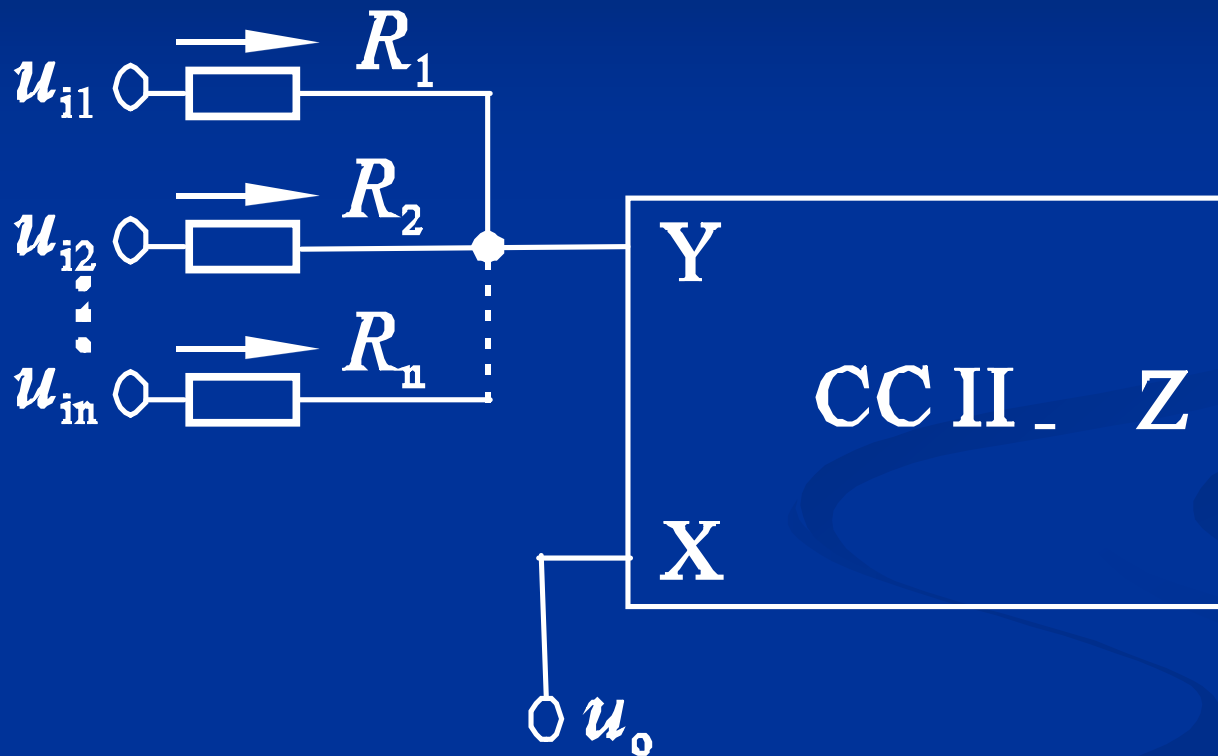
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_2}{R_1}$$

## 6) 电压积分器



$$u_o = \frac{1}{C} \int i_z dt = \frac{1}{C} \int \frac{u_i}{R} dt = \frac{1}{RC} \int u_i dt$$

## 7) 电压加法器





$$u_o = u_y$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{u_{ij} - u_y}{R_j} = 0$$

设  $R_1 = R_2 = \dots = R_n$

得：

$$u_o = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{ij}$$

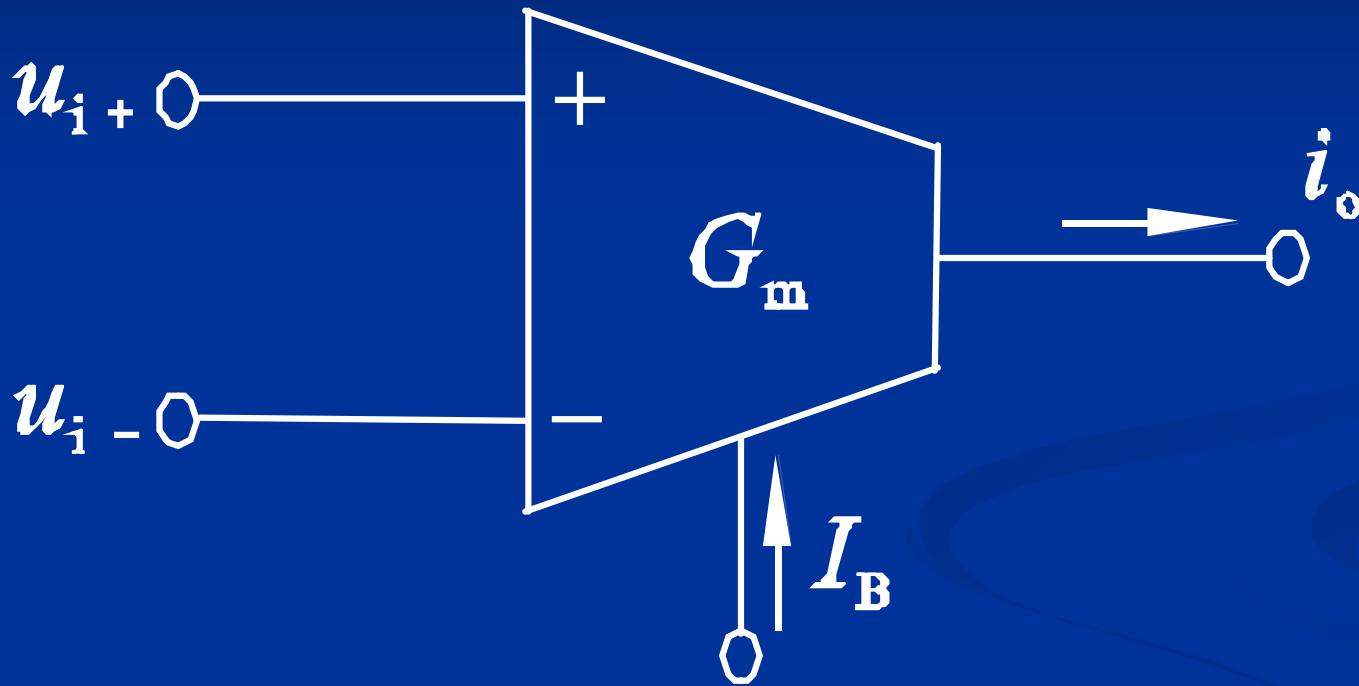
# 9.4 跨导运算放大器

## 9.4.1 OTA的基本概念

## 9.4.2 双极型集成OTA

## 9.4.3 OTA电路的应用

## 9.4.1 OTA的基本概念



$$i_o = G_m (u_{i+} - u_{i-}) = G_m u_{id}$$

小信号下，跨导增益与偏置电流的关系式：

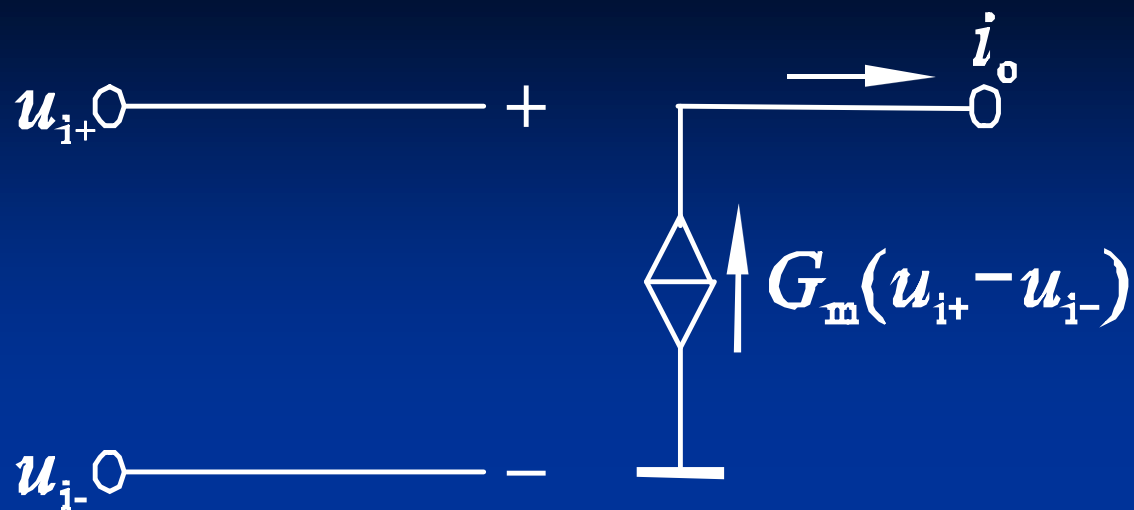
$$G_m = hI_B$$

跨导增益因子：

$$h = \frac{q}{2kT} = \frac{1}{2U_T}$$

在室温条件下：

$$G_m = 19.2I_B$$

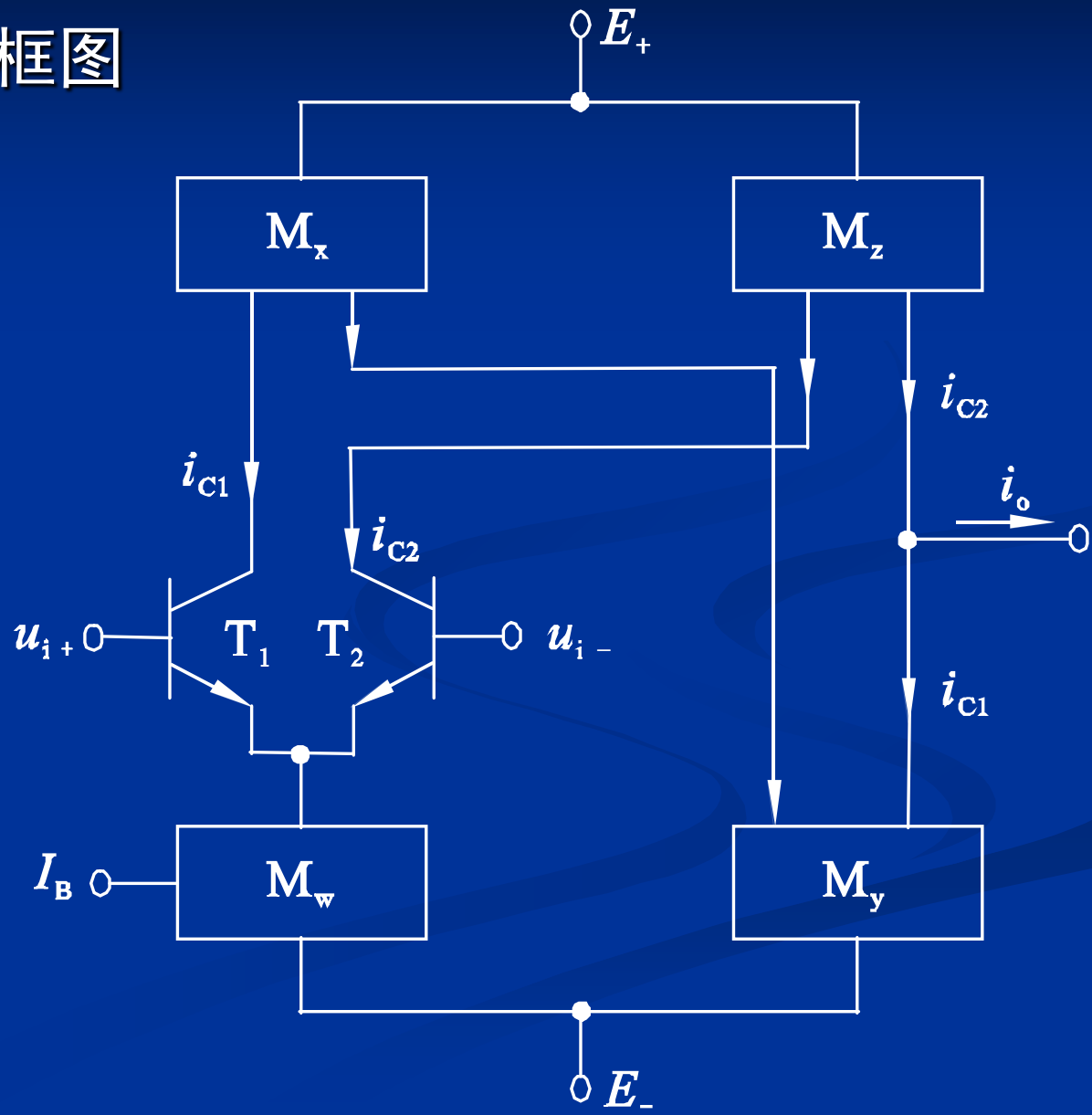


OTA具有下列性能特点：

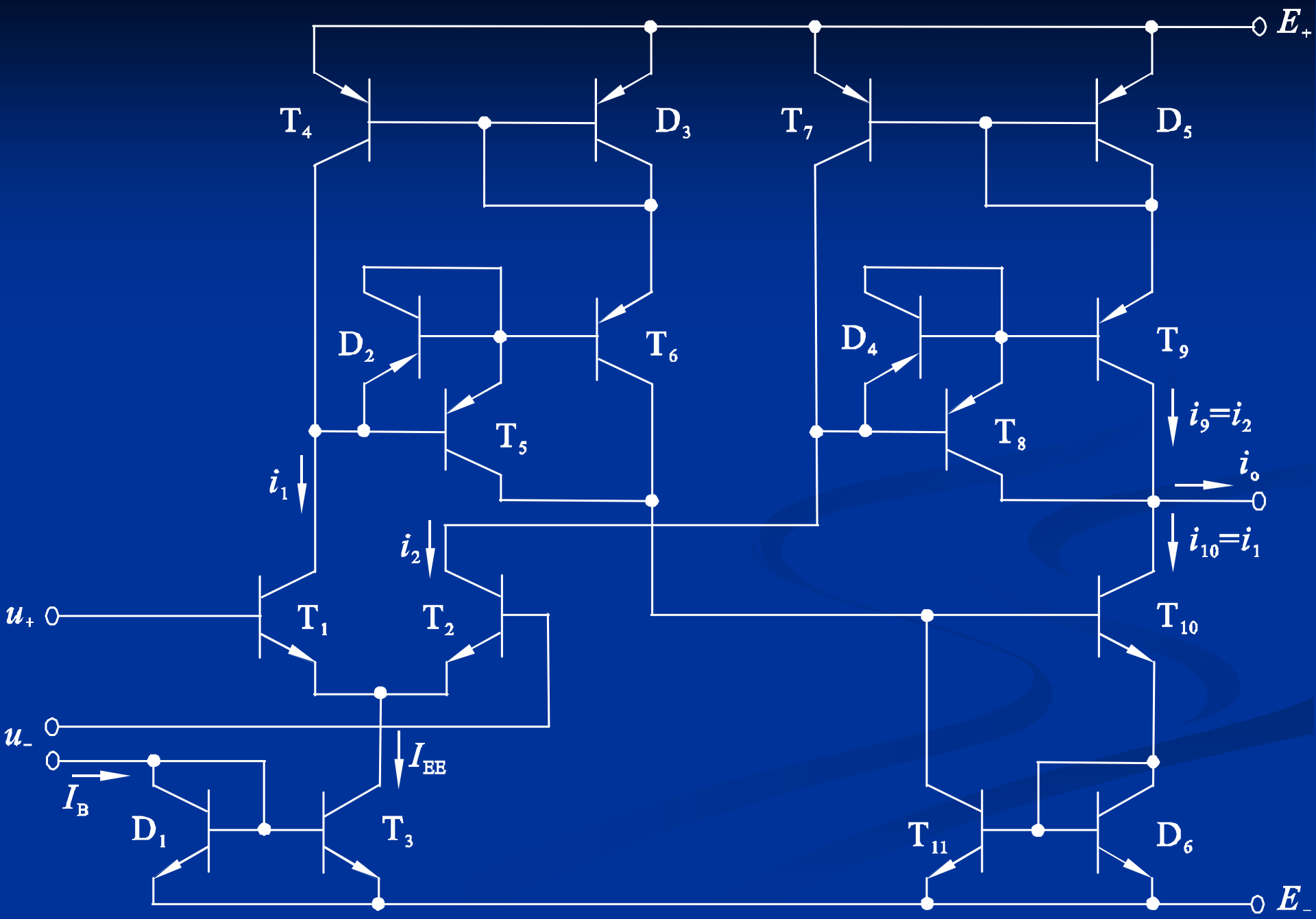
- (1) 输入电压控制输出电流，开环增益为跨导；
- (2) 改变控制电流可对开环增益进行连续调节；
- (3) 具有电流模式电路的特点，如频带宽、高频性能好等。

# 9.4.2 双极型集成OTA

## 1. 双极型OTA结构框图



## 2. 电路组成



### 3. 传输特性分析

设OTA电路  $i_9 = i_2$ ,  $i_{10} = i_1$ ,  $i_o = i_9 - i_{10} = i_2 - i_1$

可得:  $i_o = i_2 - i_1 = -I_B \operatorname{th} \frac{u_{id}}{2U_T}$

$i_o$  与  $u_{id}$  之间的关系为:

$$i_o = i_2 - i_1 \approx -I_B \frac{u_{id}}{2U_T}$$

开环跨导增益:  $G_m = \frac{i_o}{u_{id}} = -\frac{I_B}{2U_T}$

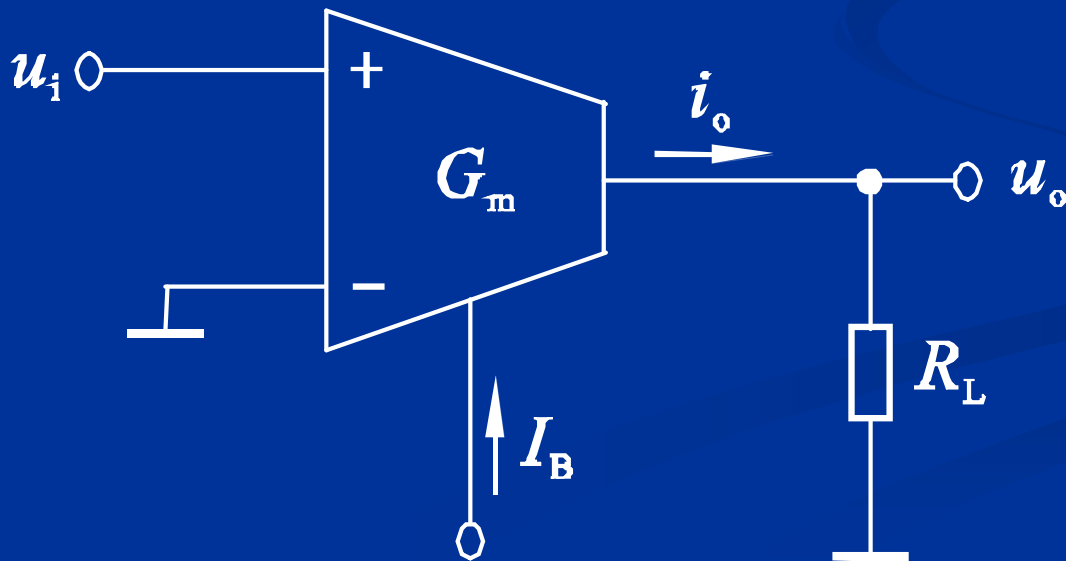
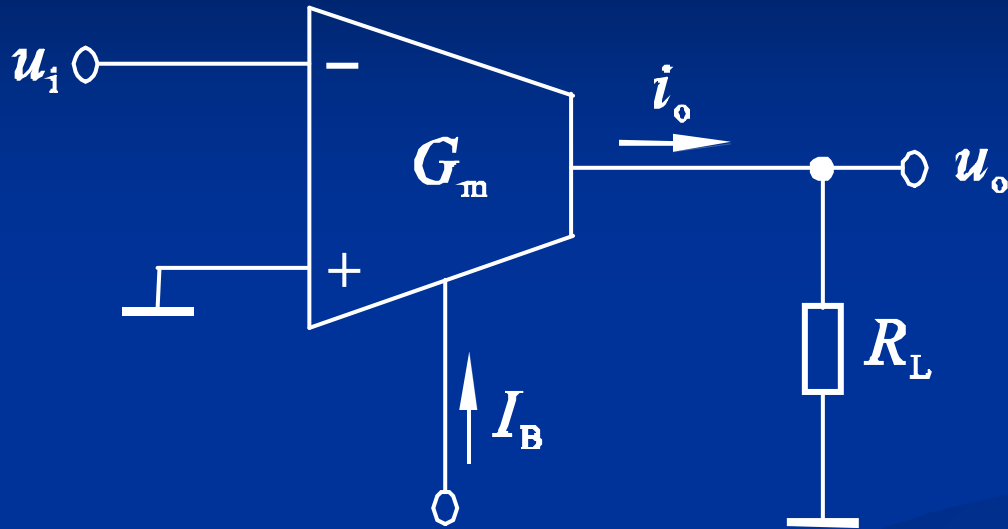
常温下, 可得:  $G_m = -\frac{I_B}{2 \times 26\text{mV}} = -19.2I_B$

所以:  $i_o = G_m (u_{i+} - u_{i-}) = -19.2I_B (u_{i+} - u_{i-})$



# 9.4.3 OTA电路的应用

## 1. 增益可控电压放大器



反相电压放大器，输出电压和电压增益分别为：

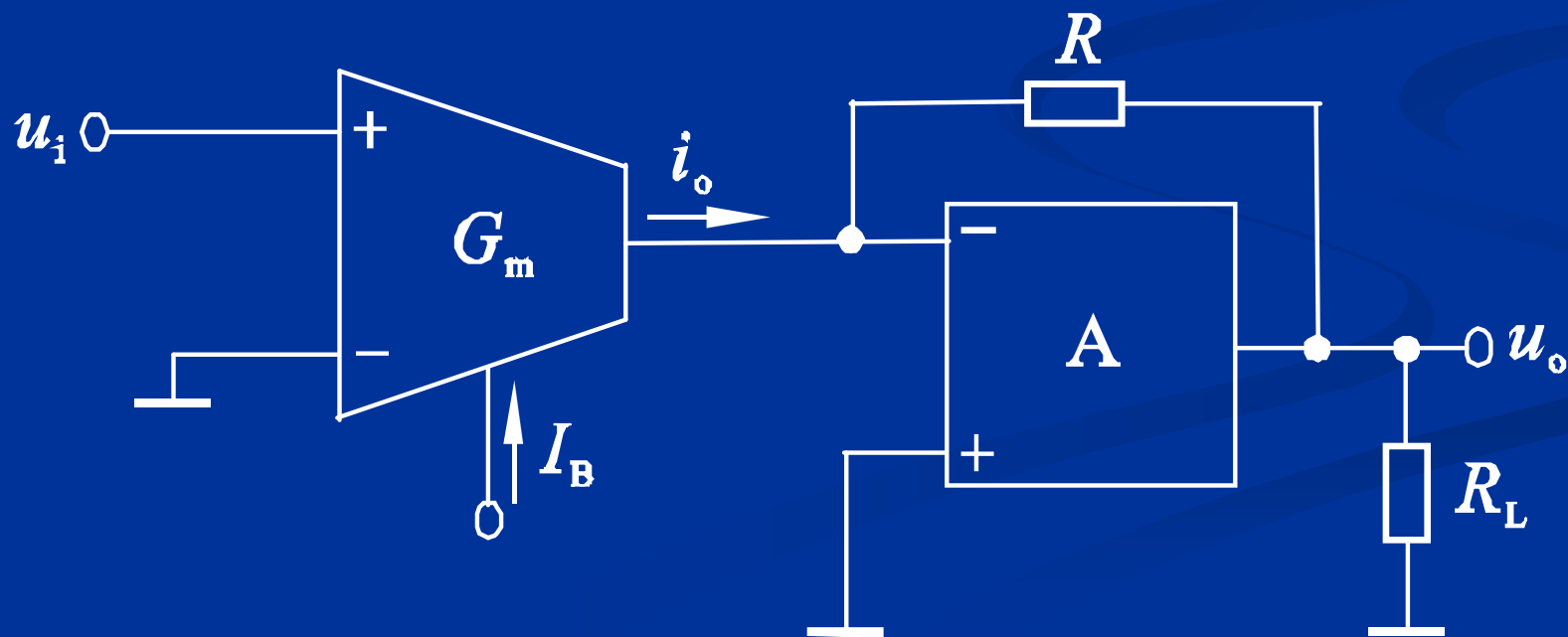
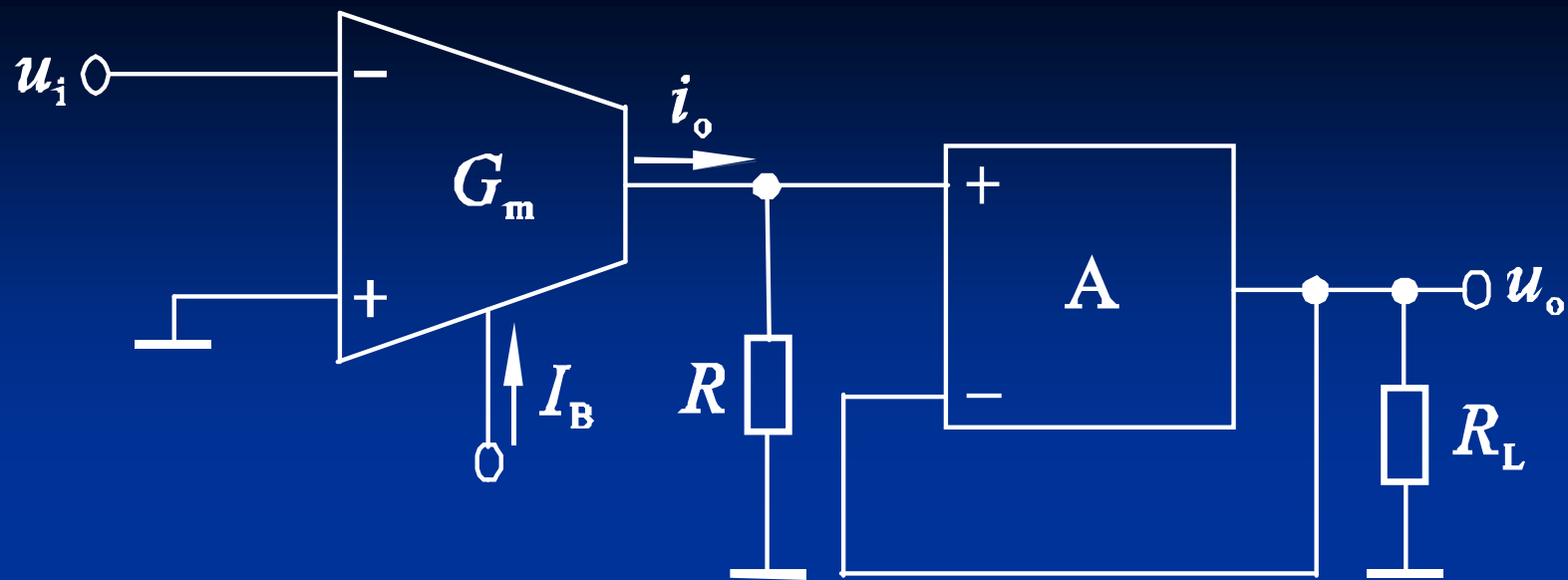
$$u_o = -G_m u_i R_L$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -G_m R_L$$

同相电压放大器，输出电压和电压增益分别为：

$$u_o = G_m u_i R_L$$

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



两种电路的输出电压和电压增益分别对应相等：

$$u_o = -G_m u_i R$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -G_m R$$

## 2. 模拟电阻

### 1) 一端接地的模拟电阻

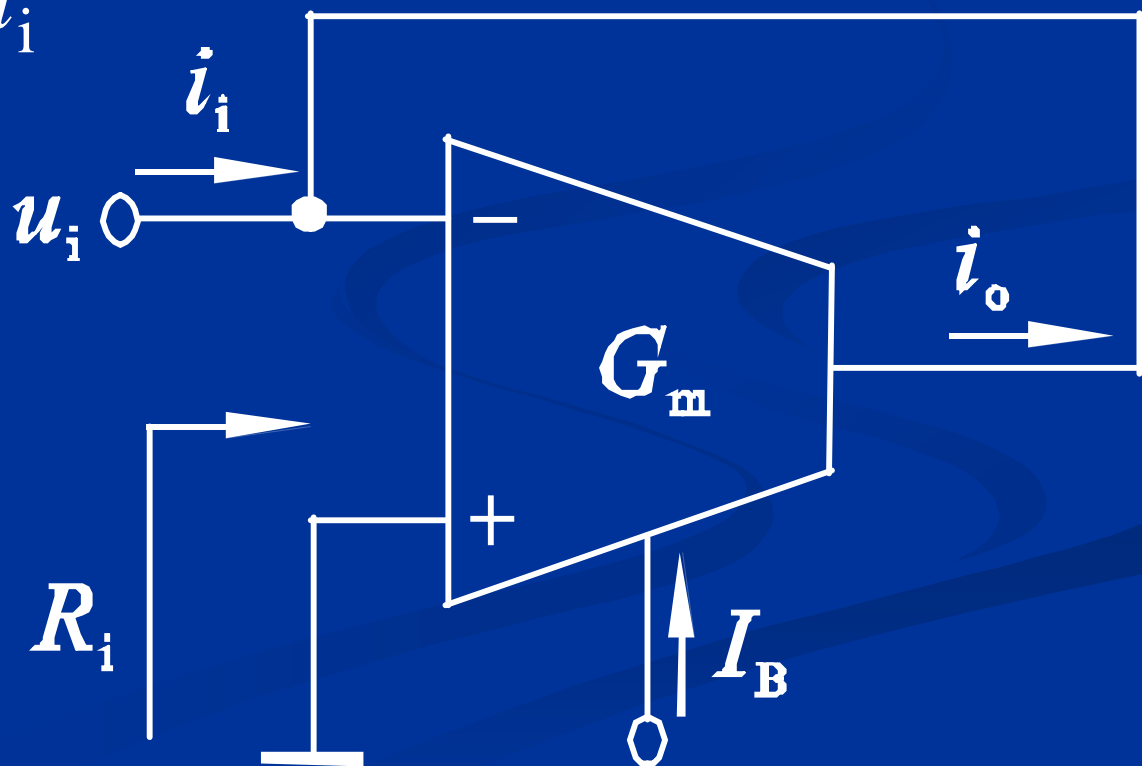
设OTA为理想器件，流入两个输入端的电流为零，则有：

$$i_i = -i_o$$

$$i_o = -G_m u_i$$

从反相输入端视入的  
输入阻抗为：

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{1}{G_m}$$



## 2) 浮地模拟电阻

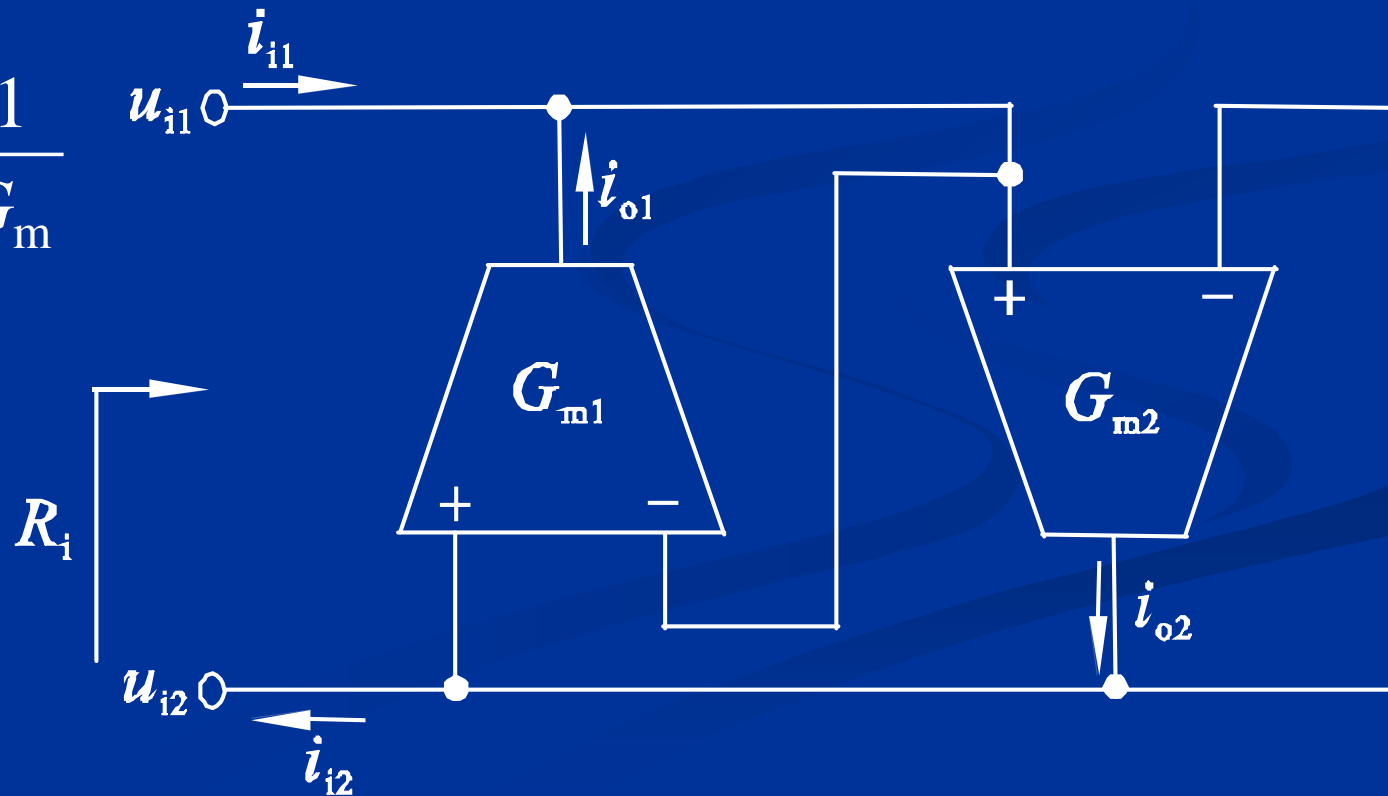
设两个OTA的跨导增益相等,

于是:  $i_{i1} = -i_{o1} = G_m(u_{i1} - u_{i2})$

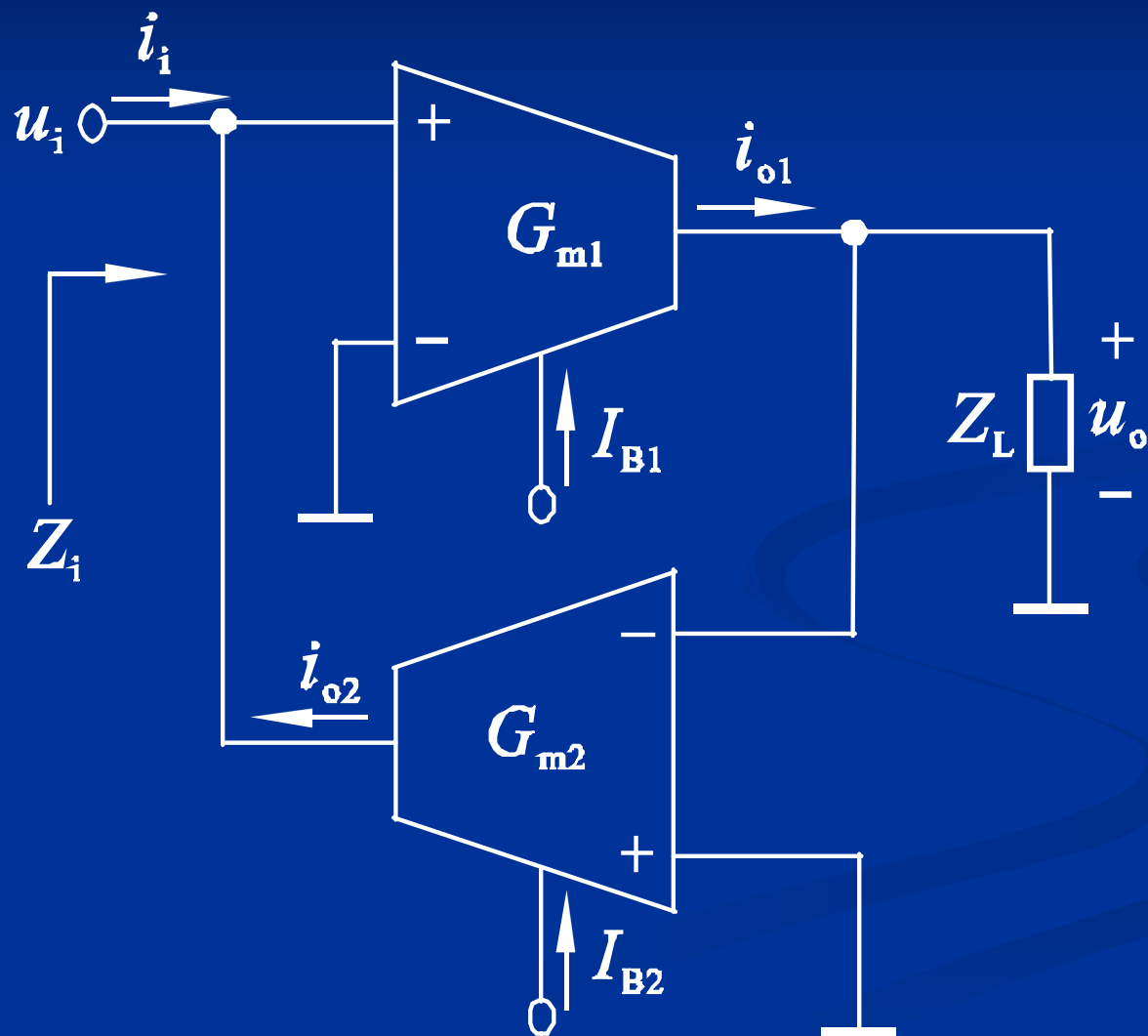
$$i_{i2} = i_{o2} = G_m(u_{i1} - u_{i2}) = i_{i1}$$

输入阻抗:

$$R_i = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{i_{i1}} = \frac{1}{G_m}$$



### 3. 回转器



有：

$$i_{o1} = G_{m1} u_i$$

$$u_o = i_{o1} Z_L$$

$$i_{o2} = -G_{m2} u_o$$

$$i_i = -i_{o2}$$

输入阻抗为：

$$Z_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{1}{G_{m1} G_{m2} Z_L}$$

若：

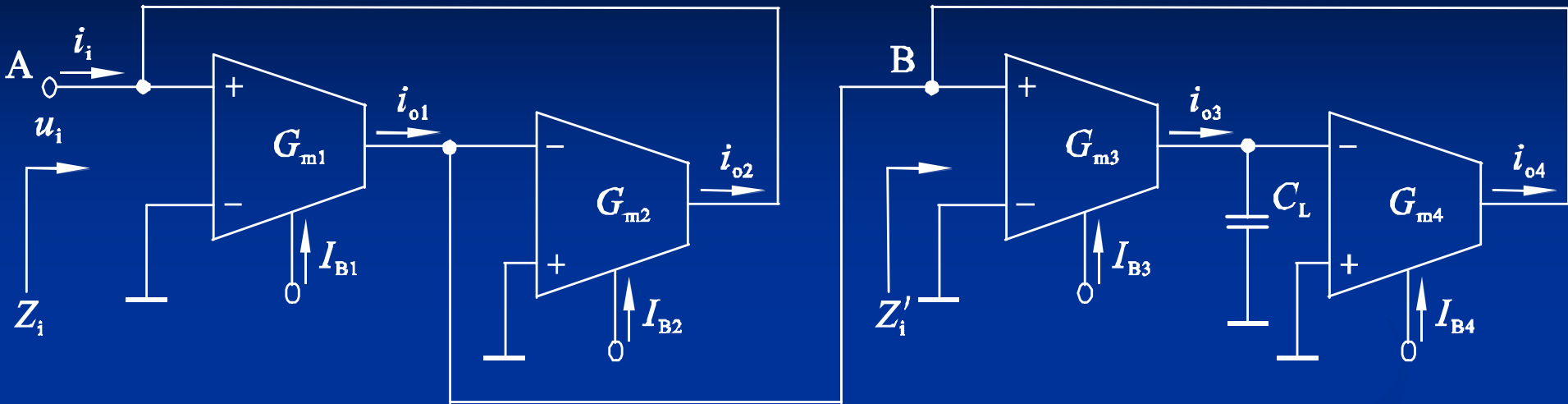
$$G_{m1} = G_{m2} = G_m$$

则有：

$$Z_i = \frac{1}{G_m^2 Z_L}$$



## 4. 模拟可变电容



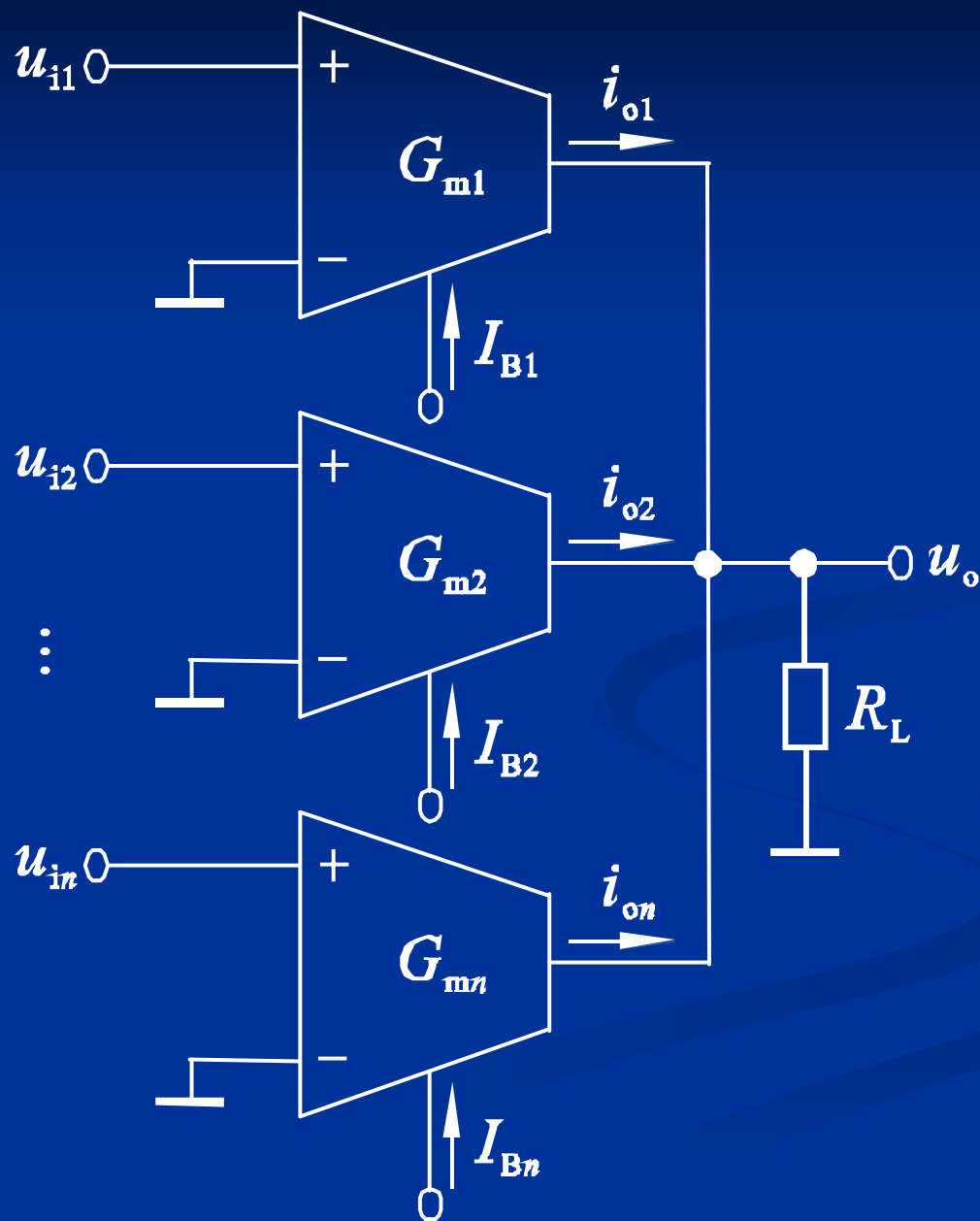
节点B、A到公共端之间的复频域输入阻抗表达式：

$$Z'_i(s) = \frac{sC_L}{G_{m3}G_{m4}}, \quad Z_i(s) = \frac{1}{G_{m1}G_{m2}Z'_i} = \frac{1}{s \frac{G_{m1}G_{m2}}{G_{m3}G_{m4}} C_L} = \frac{1}{sC_\varphi}$$

等效电容值为：

$$C_\varphi = \frac{G_{m1}G_{m2}}{G_{m3}G_{m4}} C_L$$

## 5. 加法器



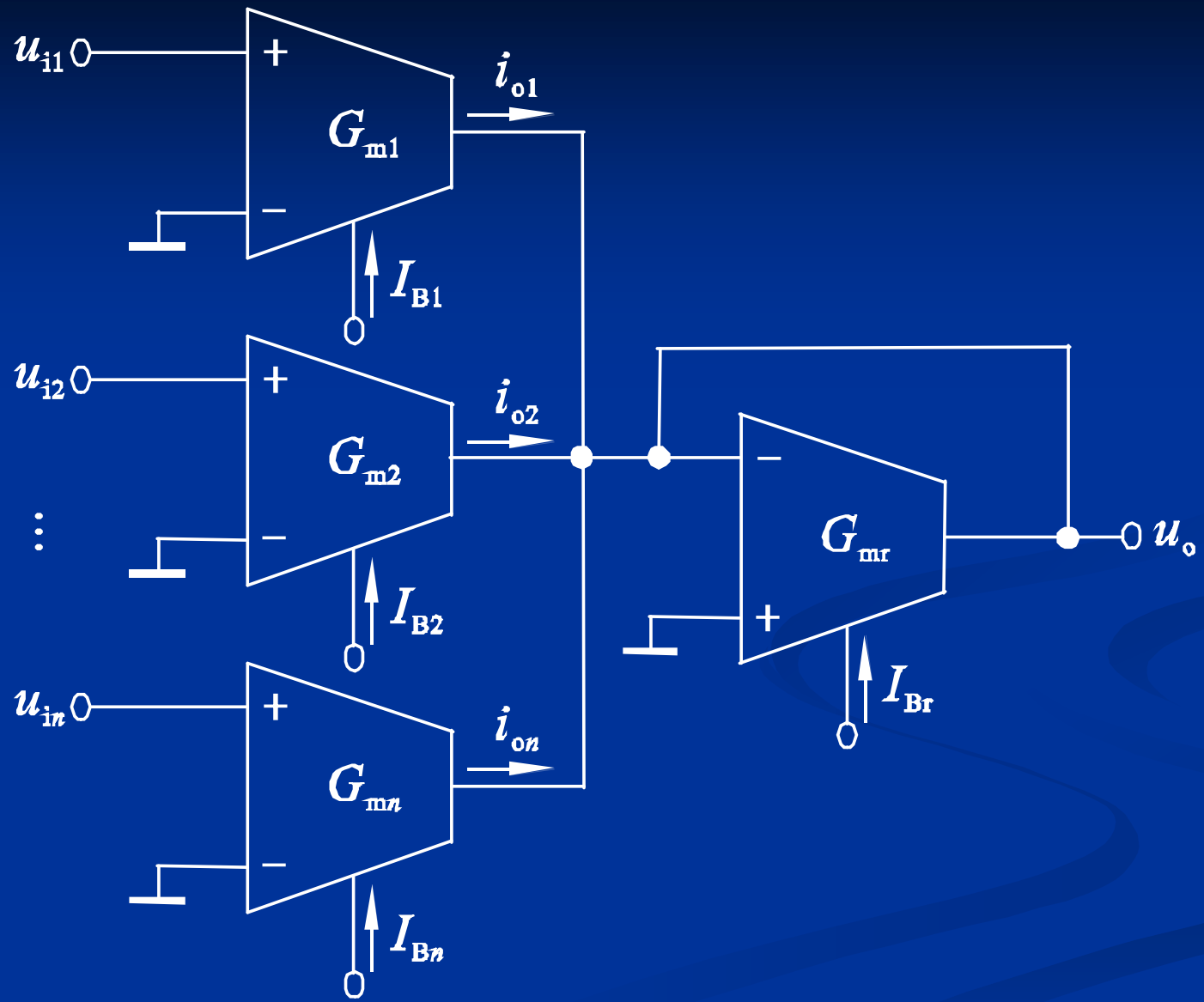
用无源电阻  $R_L$  作负载，输出电压为：

$$u_o = (i_{o1} + i_{o2} + \cdots + i_{on})R_L = (G_{m1}u_{i1} + G_{m2}u_{i2} + \cdots + G_{mn}u_{in})R_L$$

若满足  $G_{m1} = G_{m2} = \cdots = G_{mn} = 1/R_L$

则输出电压为：

$$u_o = u_{i1} + u_{i2} + \cdots + u_{in}$$



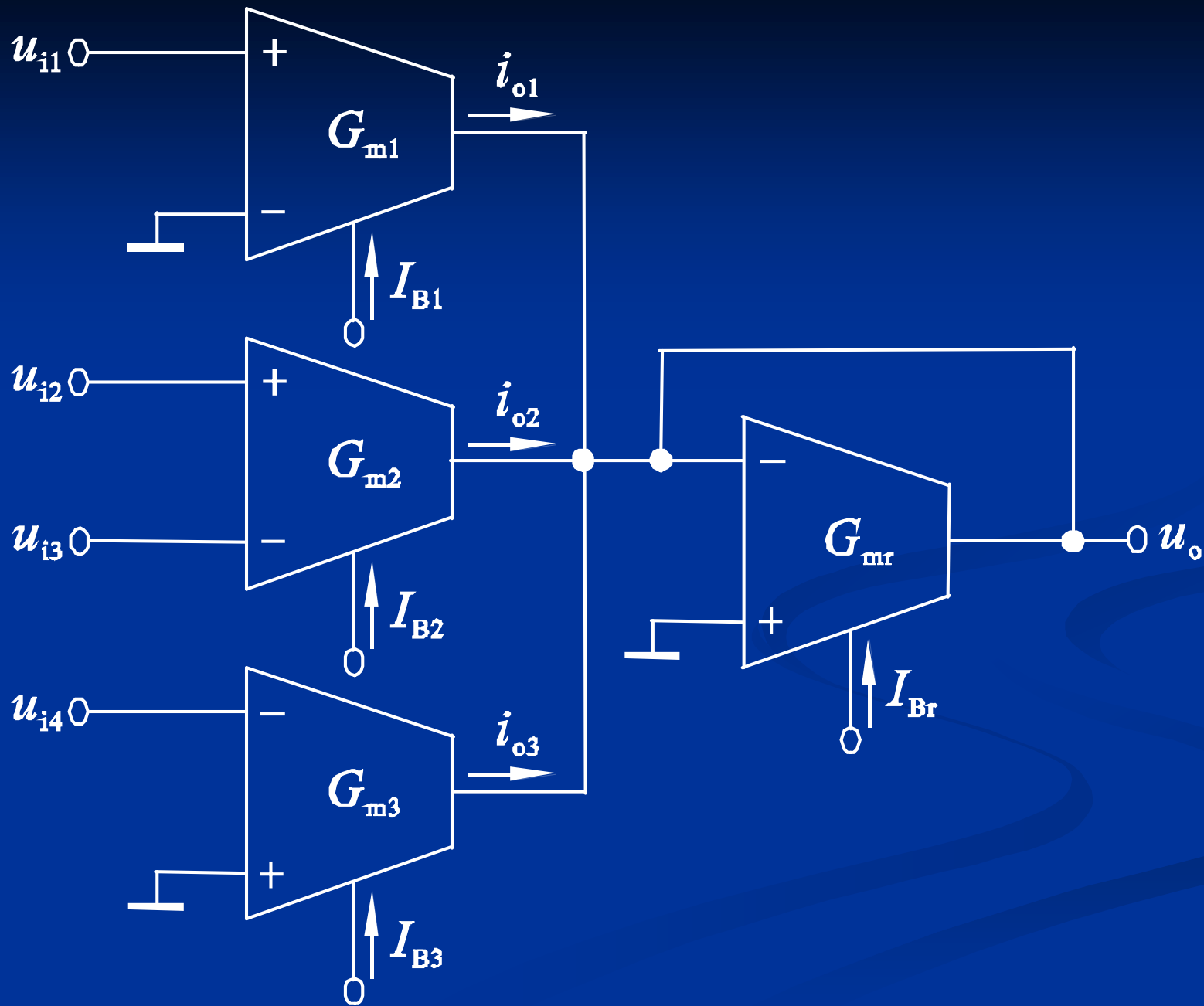
用OTA接地模拟电阻  $1/G_{mr}$  作负载  $R_L$ ，  
输出电压为：

$$u_o = (i_{o1} + i_{o2} + \cdots + i_{on})R_L = (G_{m1}u_{i1} + G_{m2}u_{i2} + \cdots + G_{mn}u_{in})\frac{1}{G_{mr}}$$

若满足  $G_{m1} = G_{m2} = \cdots = G_{mn} = G_{mr}$

则输出电压为：

$$u_o = u_{i1} + u_{i2} + \cdots + u_{in}$$



该电路  $1/G_{mr}$  取作负载，  
输出电压为：

$$u_o = \left( G_{m1} u_{i1} + G_{m2} u_{i2} - G_{m2} u_{i3} - G_{m3} u_{i4} \right) \frac{1}{G_{mr}}$$

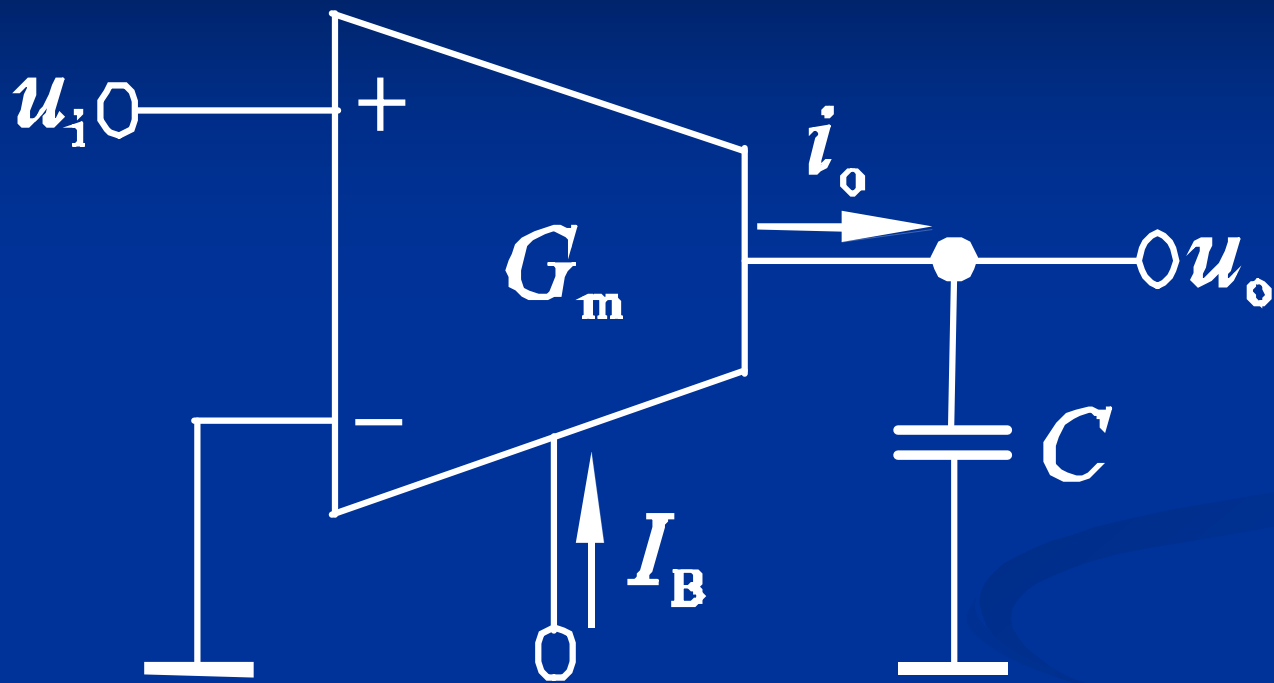
若满足  $G_{m1} = G_{m2} = G_{m3} = G_{mr}$

则输出电压为：

$$u_o = u_{i1} + u_{i2} - u_{i3} - u_{i4}$$

## 6. 积分器

### 1) 电压模式积分器



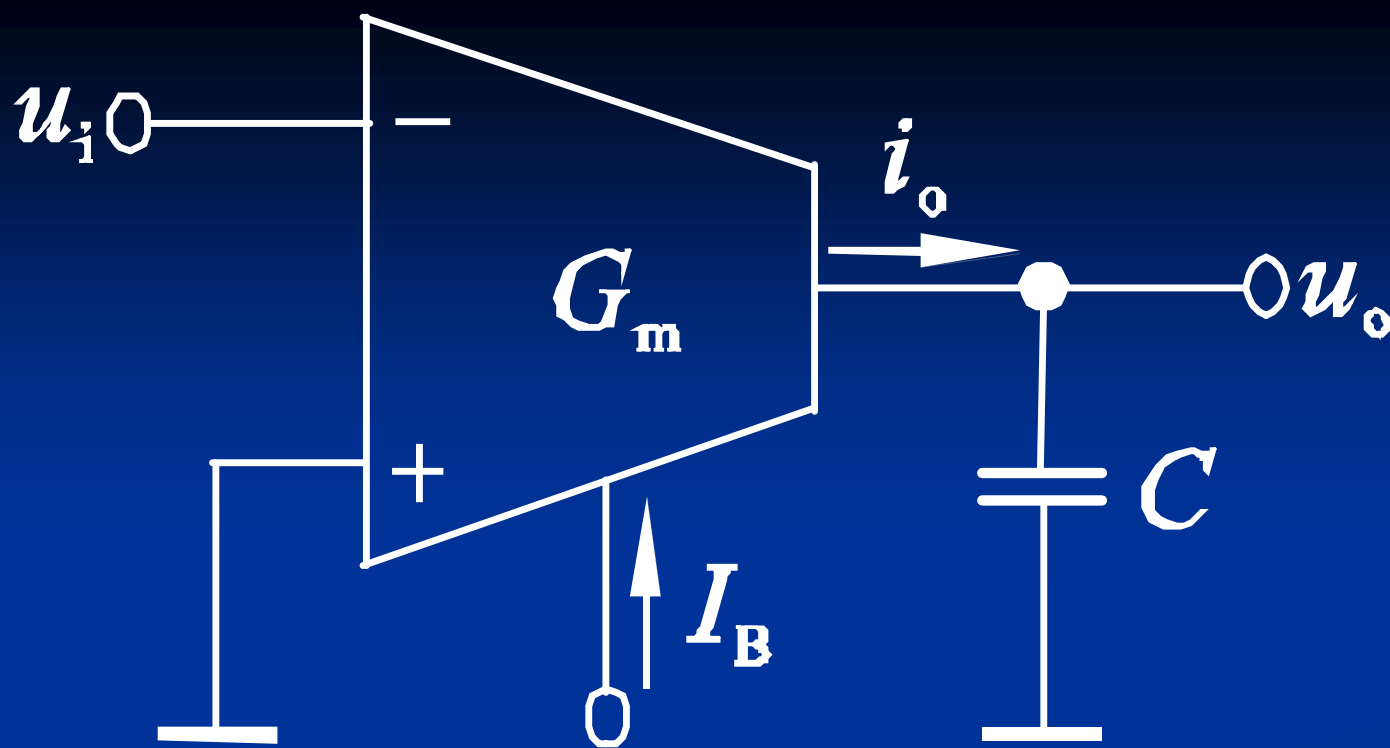
输出电压为：

$$u_o(s) = i_o(s) \frac{1}{sC} = \frac{G_m}{sC} u_i(s)$$

所以电压传输函数为：

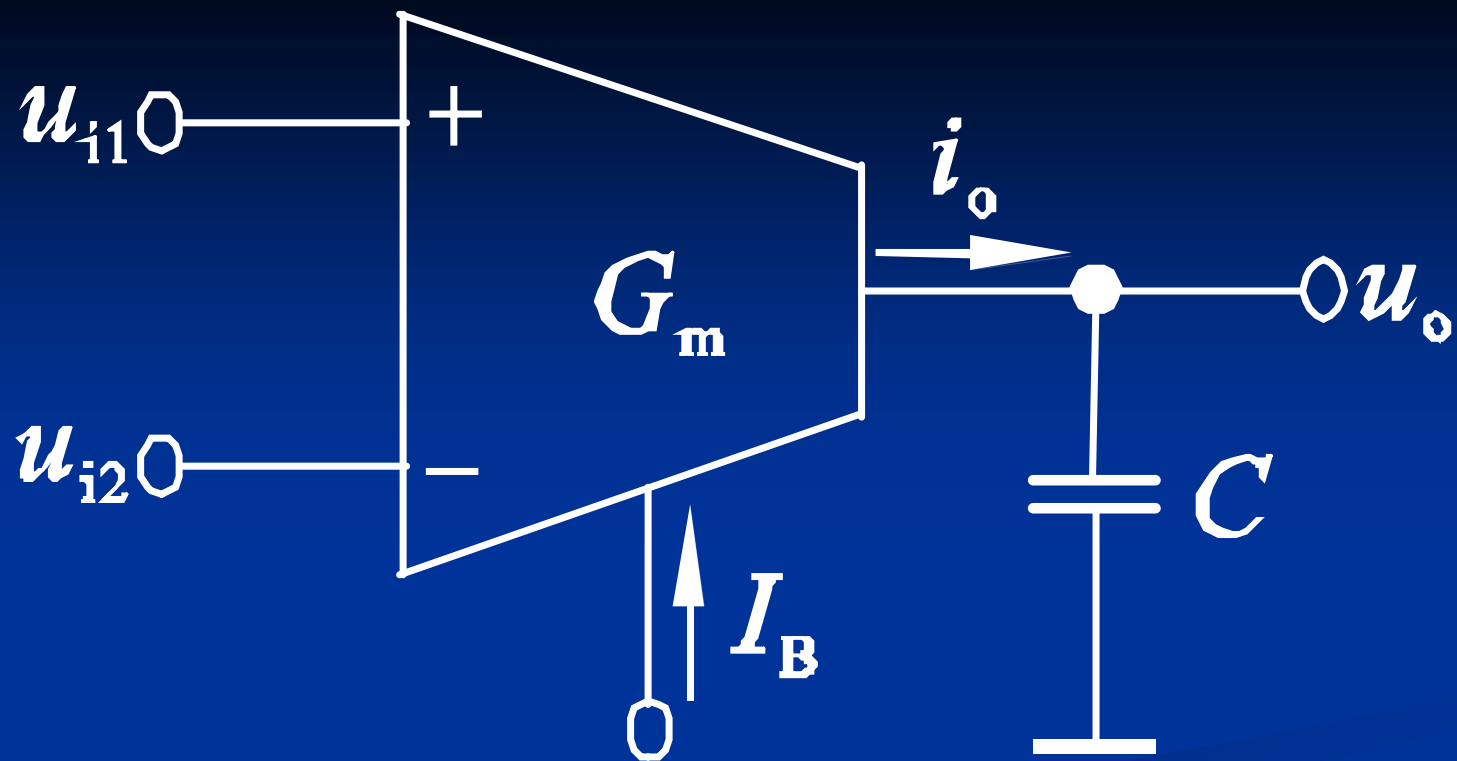
$$A_u(s) = \frac{u_o(s)}{u_i(s)} = \frac{G_m}{sC}$$





$$A_u(s) = \frac{u_o(s)}{u_i(s)} = -\frac{G_m}{sC}$$

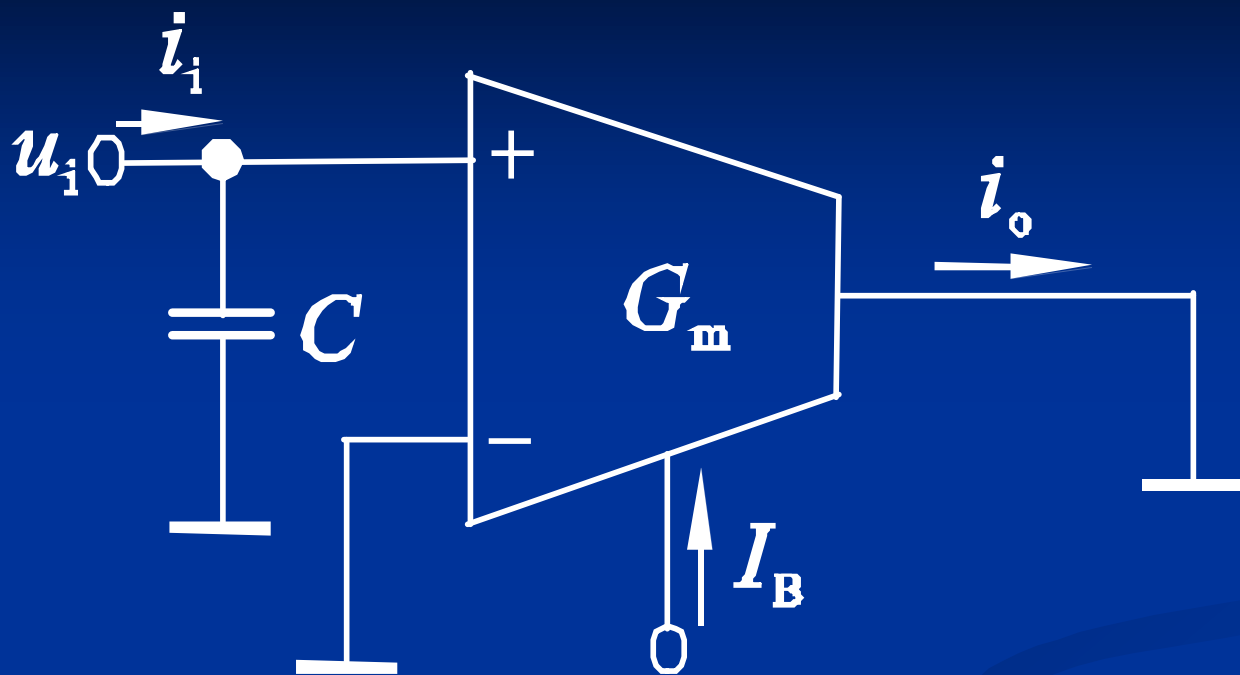
$$u_o(t) = -\frac{G_m}{C} \int u_i(t) dt$$



$$A_u(s) = \frac{u_o(s)}{u_{i1}(s) - u_{i2}(s)} = \frac{G_m}{sC}$$

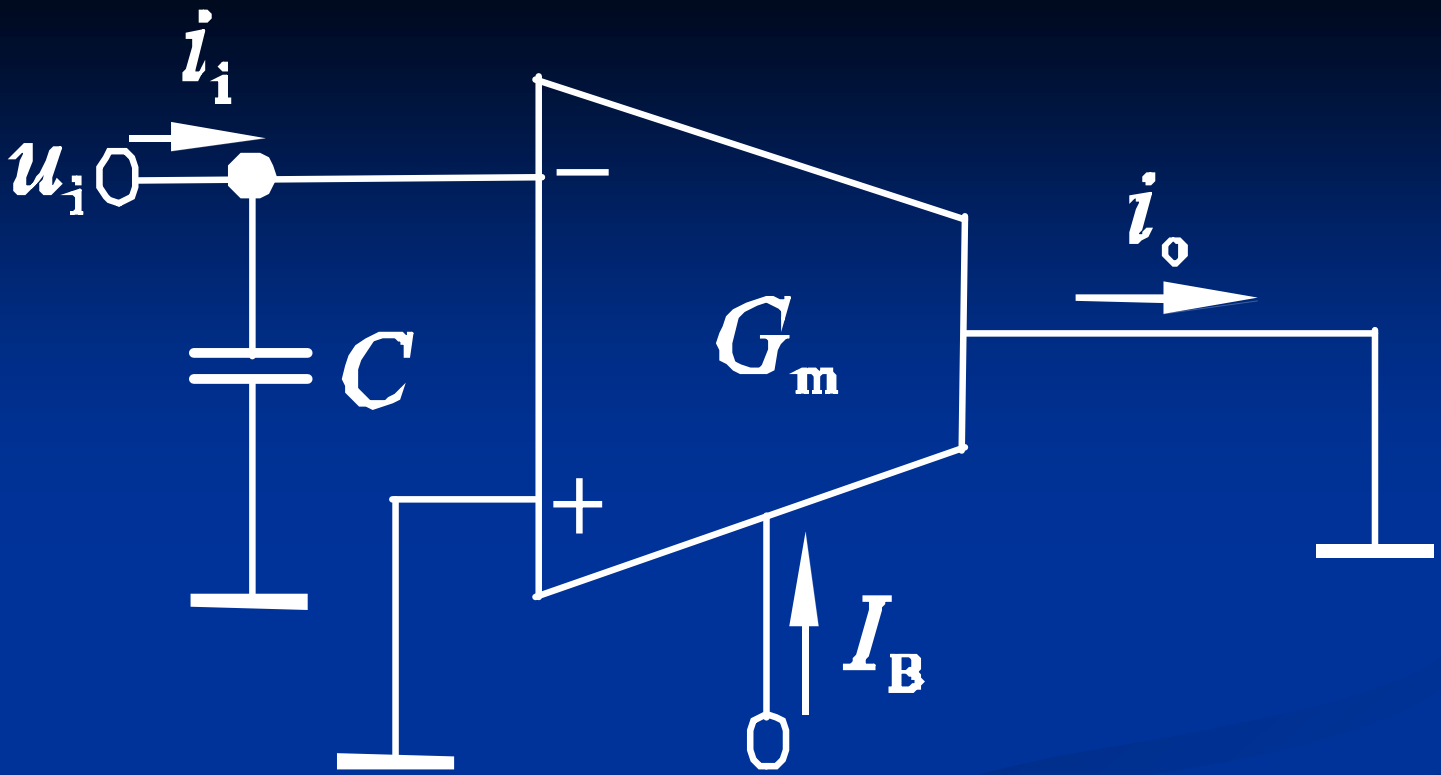
$$u_o(t) = -\frac{G_m}{C} \int u_i(t) dt$$

## 2) 电流模式积分器

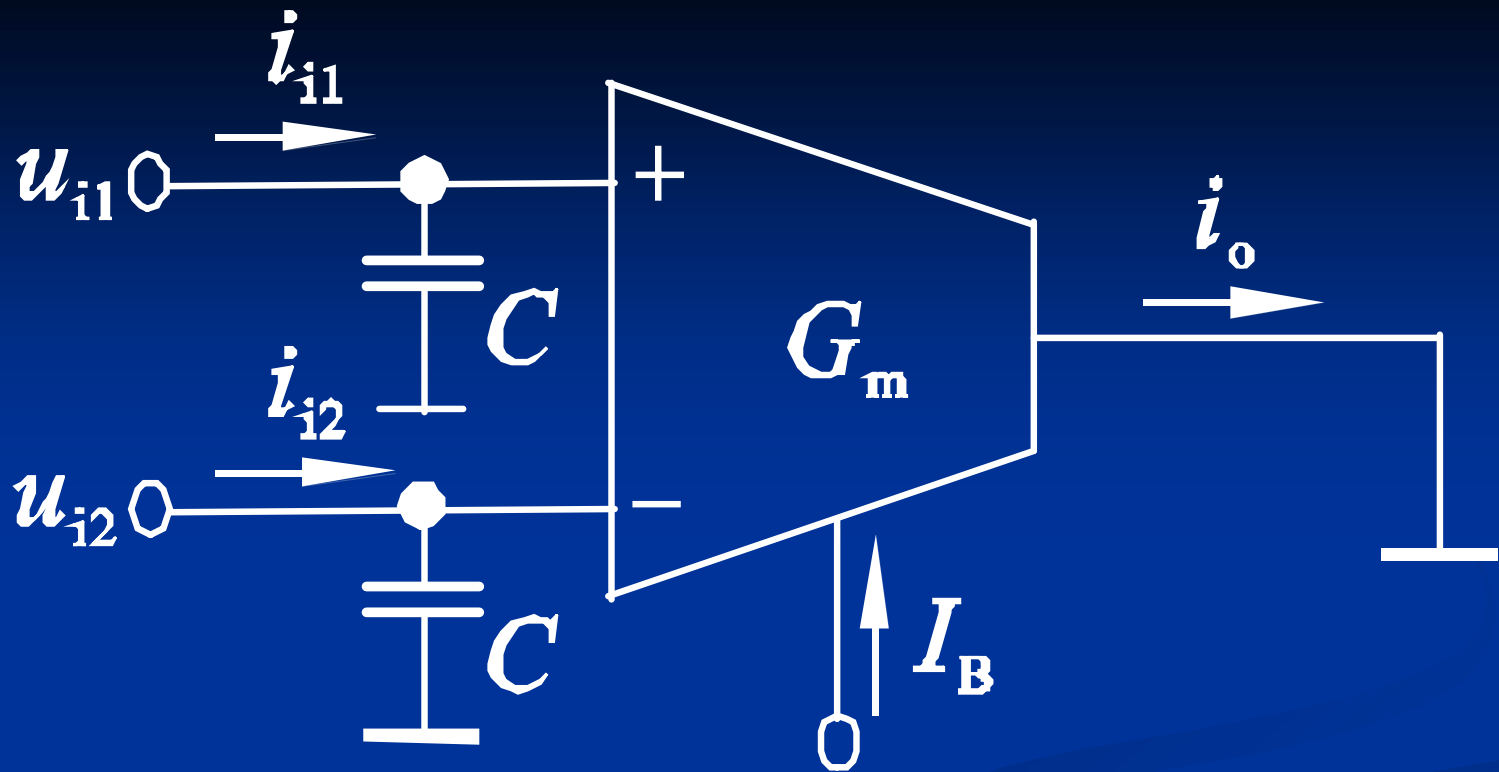


$$u_i(s) = \frac{1}{sC} i_i(s) \quad i_o(s) = G_m u_i(s) = \frac{G_m}{sC} i_i(s)$$

$$A_i = \frac{i_o(s)}{i_i(s)} = \frac{G_m}{sC}$$

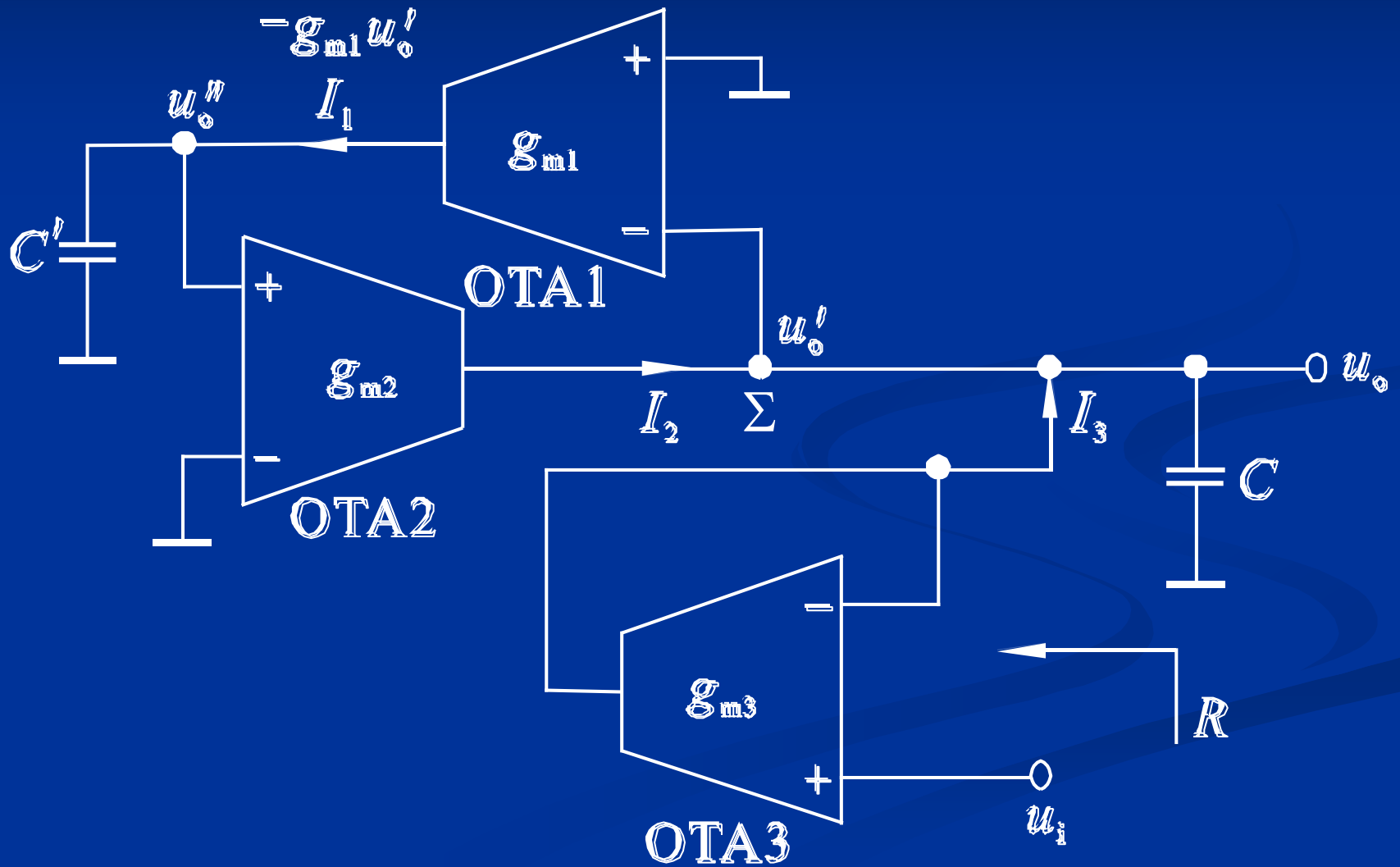


$$A_i = \frac{i_o(s)}{i_i(s)} = -\frac{G_m}{sC}$$



$$A_i = \frac{i_o(s)}{i_{i1}(s) - i_{i2}(s)} = \frac{G_m}{sC}$$

## 7. 帶通濾波器



设  $\Sigma$  点电压为  $u'_o$ ，OTA2的输出电流为  $I_2$ ，

则：
$$I_2 = g_{m2} U''_o = g_{m2} \cdot I_1 \cdot \frac{1}{sC'} = g_{m2} \cdot \frac{1}{sC'} (-g_{m1} u'_o)$$

$\Sigma$  点向左看的等效阻抗为：

$$Z_{\Sigma} = \frac{u'_o}{-I_2} = s \frac{C'}{g_{m1} g_{m2}} = sL_r$$

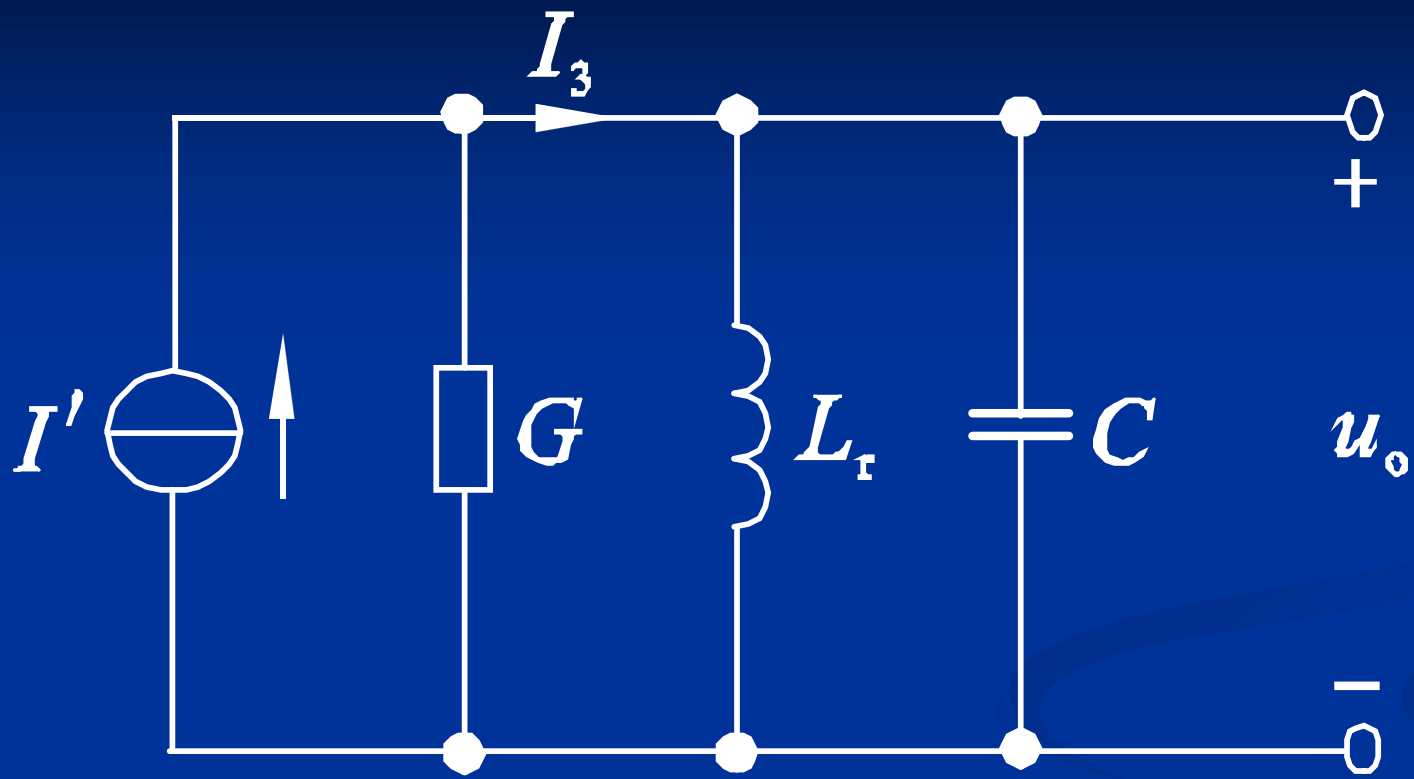
等效电感为：

$$L_r = \frac{C'}{g_{m1} g_{m2}}$$

又  $I_3 = g_{m3} (u_i - u_o) = g_{m3} u_i - g_{m3} u_o$

可见，OTA3可等效为一个电流源和一个电导，即：

$$I' = g_{m3} u_i \quad G = g_{m3}$$





令  $C' = C$

传递函数为:

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = g_{m3} \frac{1}{sC + \frac{1}{sL_r} + G} = \frac{\frac{sg_{m3}}{C}}{s^2 + s\frac{g_{m3}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}}$$

可见:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{g_{m3}}}$$

$$BW_{-3dB} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{m3}}{C}$$

$$A_u(f_o) = 1$$

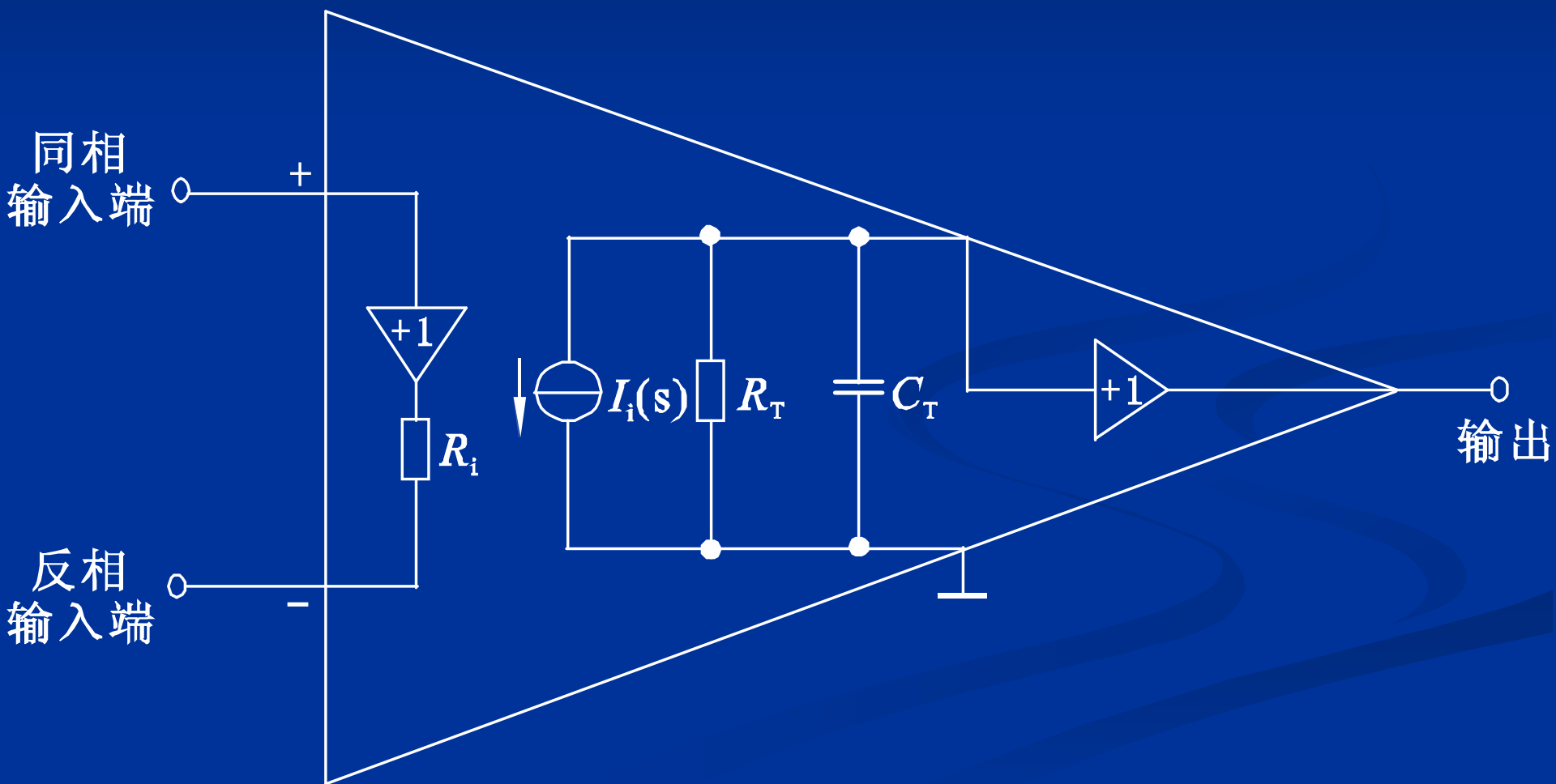
# 9.5 电流反馈型集成运算放大器

## 9.5.1 电流模集成运算放大器的基本特性

## 9.5.2 电流模运放的典型电路

## 9.5.3 电流模运放的闭环特性

# 9.5.1 电流模集成运算放大器的基本特性



$$A_r(s) = \frac{U_o(s)}{I_i(s)} = \frac{R_T}{1 + sR_T C_T}$$

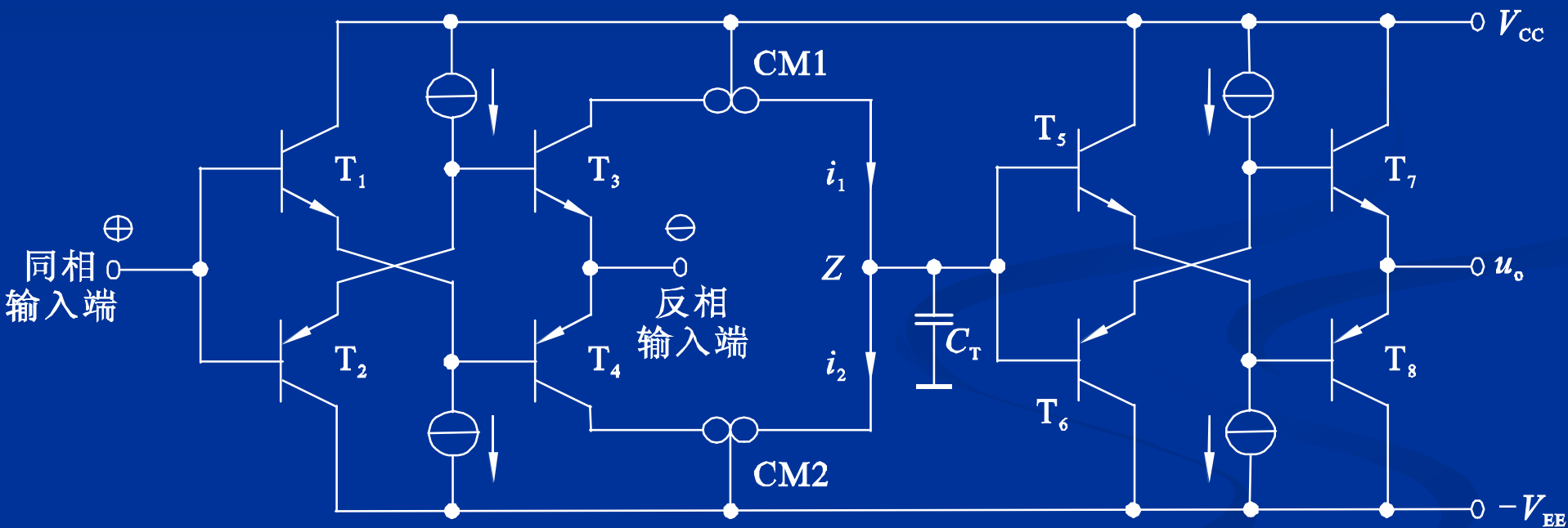
互阻增益的表达式：

$$A_r(s) = \frac{U_o(s)}{I_i(s)} = \frac{R_T}{1 + sR_T C_T}$$

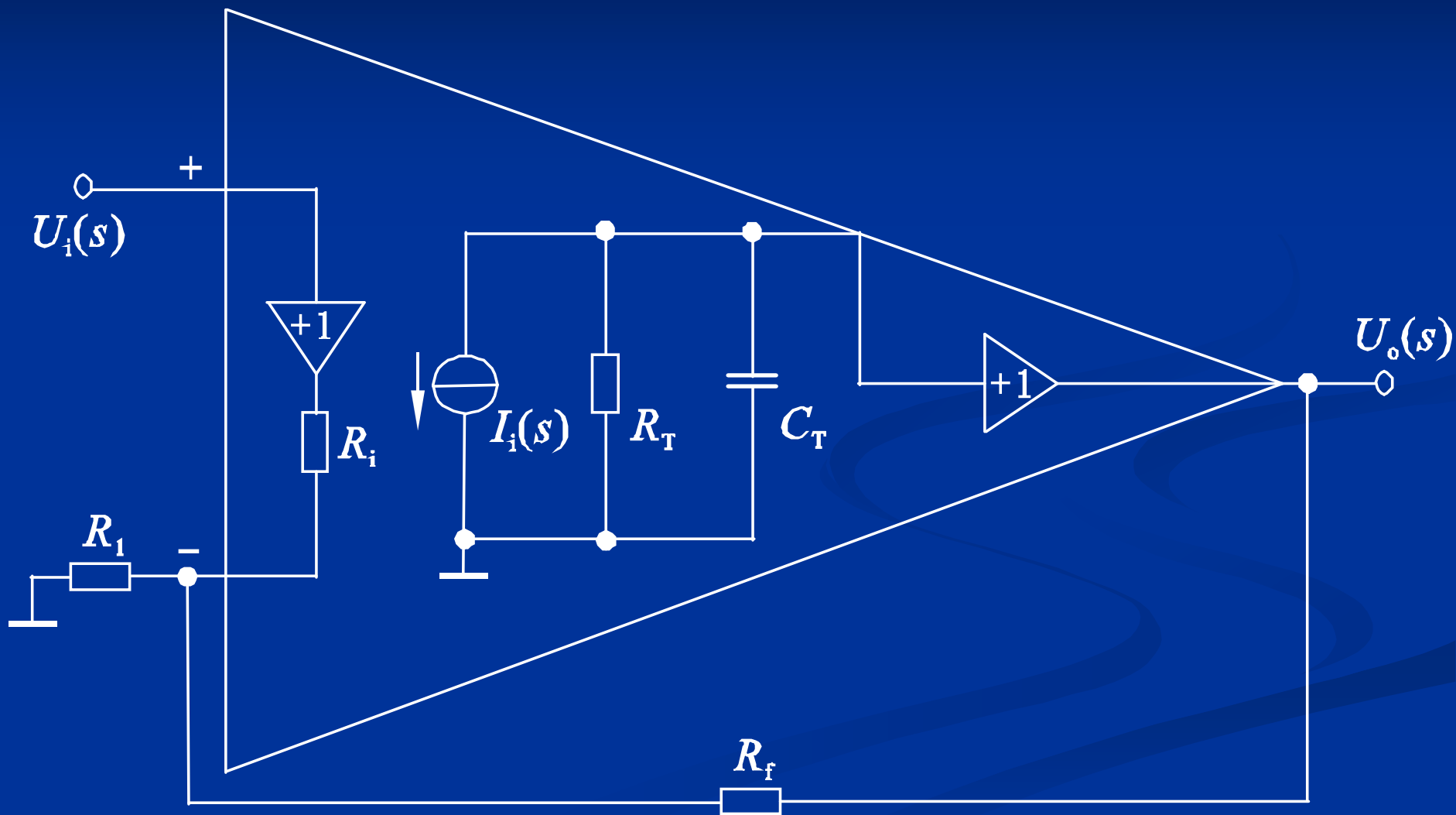
若用开环差模电压增益来表示，则：

$$A_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{U_o(s)}{I_i(s) \cdot R_i} = \frac{R_T}{R_i(1 + sR_T C_T)}$$

## 9.5.2 电流模运放的典型电路



## 9.5.3 电流模运放的闭环特性



同相输入时的闭环电压增益：

$$A_{\text{ufo}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

高频响应为：

$$A_{\text{uf}}(s) = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + \frac{R_f}{R_T} + \frac{R_f R_i}{R_T R_1} + \frac{R_i}{R_T} + s \left( \frac{R_f}{R_T} + \frac{R_f R_i}{R_T R_1} + \frac{R_i}{R_T} \right) R_T C_T}$$

故：

$$A_{\text{uf}}(s) = \frac{A_{\text{ufo}}}{1 + s[R_f + A_{\text{ufo}} R_i] C_T}$$

当  $(A_{\text{ufo}} R_i) \ll R_f$

则：

$$A_{\text{uf}}(s) = \frac{A_{\text{ufo}}}{1 + sR_f C_T}$$

闭环带宽：

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_T R_f}$$