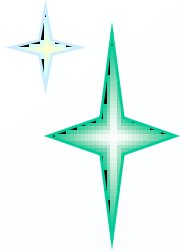




6 模拟集成电路

授课内容

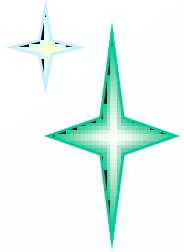
- 6.1 模拟集成电路中的直流偏置技术
- 6.2 差分式放大电路
- 6.3 差分式放大电路的传输特性
- 6.4 集成电路运算放大器
- 6.5 实际集成运算放大器的主要参数和对应用电路的影响



6 模拟集成电路

教学目的、要求：

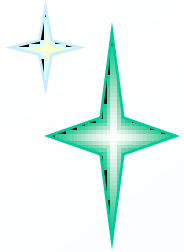
- 1.掌握集成电路运算放大器中的电流源
- 2.掌握差分式放大电路参数计算
- 3.了解集成电路运算放大器工作原理
- 4.了解集成电路运算放大器的主要参数的应用
- 5.了解专用型集成电路运算放大器的特点
- 6.了解放大电路中的噪声与干扰的机理。



6 模拟集成电路

教学重点:

1. 正确理解差模信号、共模信号、零点漂移和共模抑制比等基本概念
2. 掌握集成电路、电流源和运算放大器的特点;
3. 掌握差分放大电路的组成、抑制零点漂移的原理以及各种差分放大电路静态工作点和增益的计算;
4. 深刻理解运算放大器主要性能指标的含义。



6 模拟集成电路

教学难点:

运算放大器的内部组成、基本工作原理以及它的分析和计算



6.1 模拟集成电路中的 直流偏置技术

6.1.1 BJT电流源电路

1. 镜像电流源
2. 微电流源
3. 高输出阻抗电流源
4. 组合电流源

6.1.2 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源
2. MOSFET多路电流源
3. JFET电流源

6.1.1 BJT电流源电路

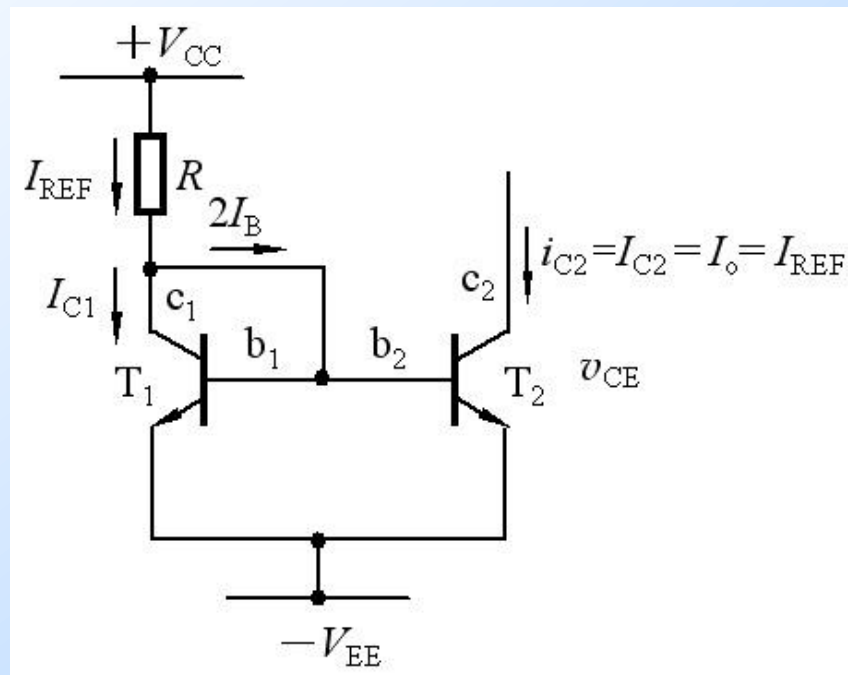
1. 镜像电流源

T_1 、 T_2 的参数全同

即 $\beta_1 = \beta_2$, $I_{CEO1} = I_{CEO2}$

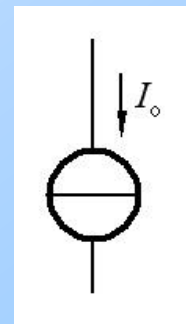
$V_{BE2} = V_{BE1}$ $I_{E2} = I_{E1}$

$I_{C2} = I_{C1}$



当BJT的 β 较大时，基极电流 I_B 可以忽略

$$I_o = I_{C2} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - (-V_{EE})}{R} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R}$$



代表符号

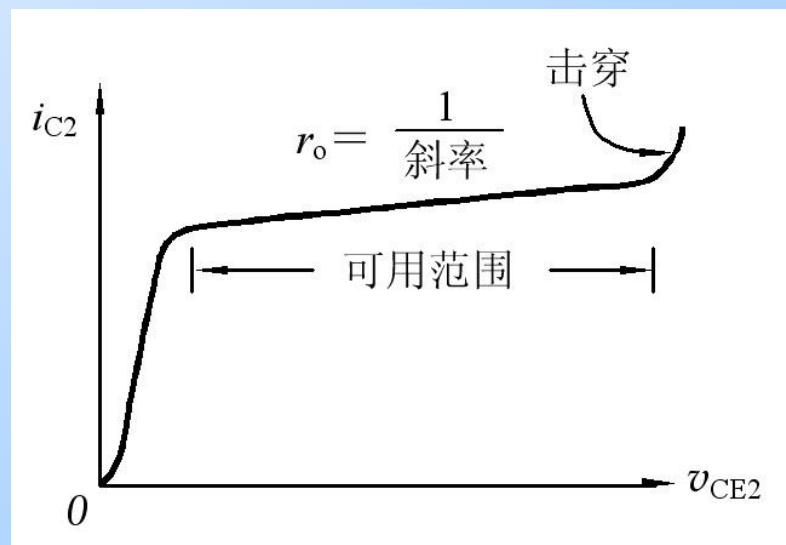
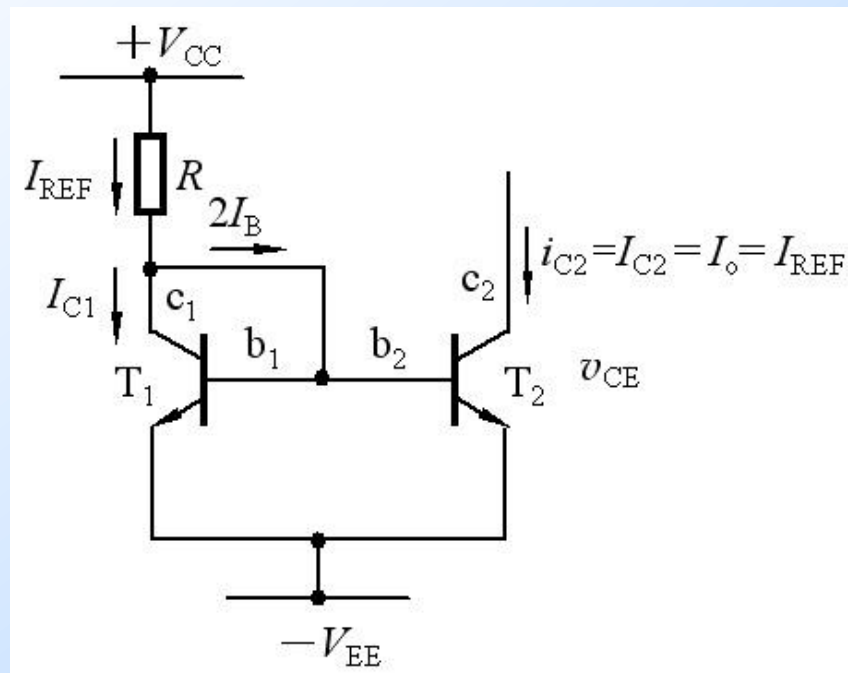
6.1.1 BJT电流源电路

1. 镜像电流源

动态电阻

$$r_o = \left(\frac{\partial i_{C2}}{\partial v_{CE2}} \right)^{-1} \Big|_{I_{B2}}$$
$$= r_{ce}$$

一般 r_o 在几百千欧以上



6.1.1 BJT电流源电路

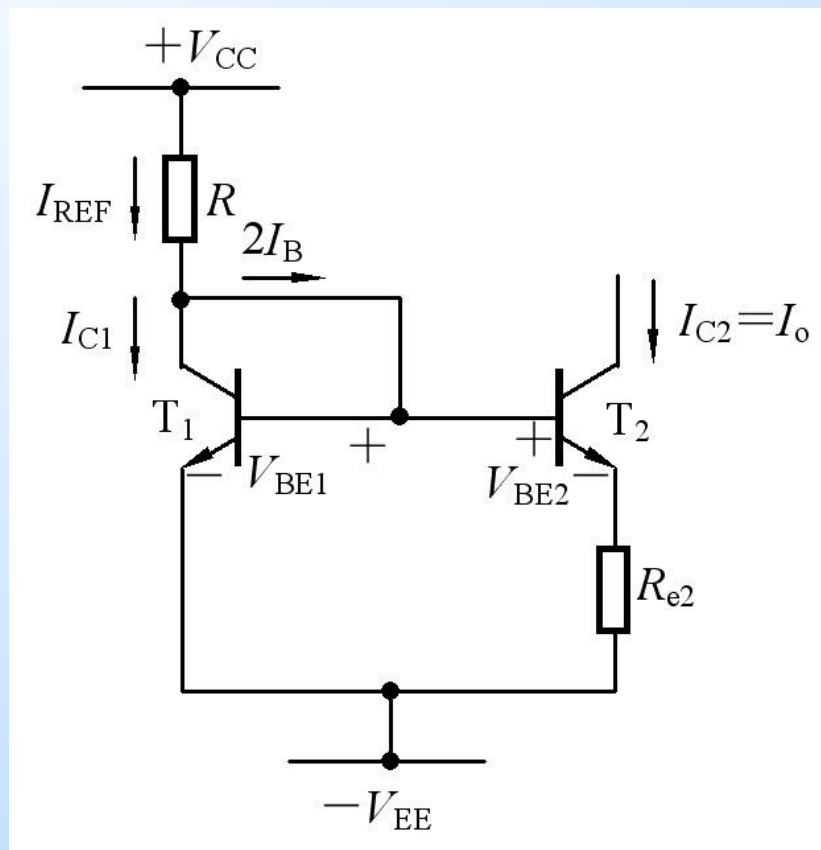
2. 微电流源

$$I_O = I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}}$$
$$= \frac{\Delta V_{BE}}{R_{e2}}$$

由于 ΔV_{BE} 很小,

所以 I_{C2} 也很小。 $r_o \approx r_{ce2} \left(1 + \frac{\beta R_{e2}}{r_{be2} + R_{e2}} \right)$

(参考射极偏置共射放大电路的输出电阻 R'_o)



6.1.1 BJT电流源电路

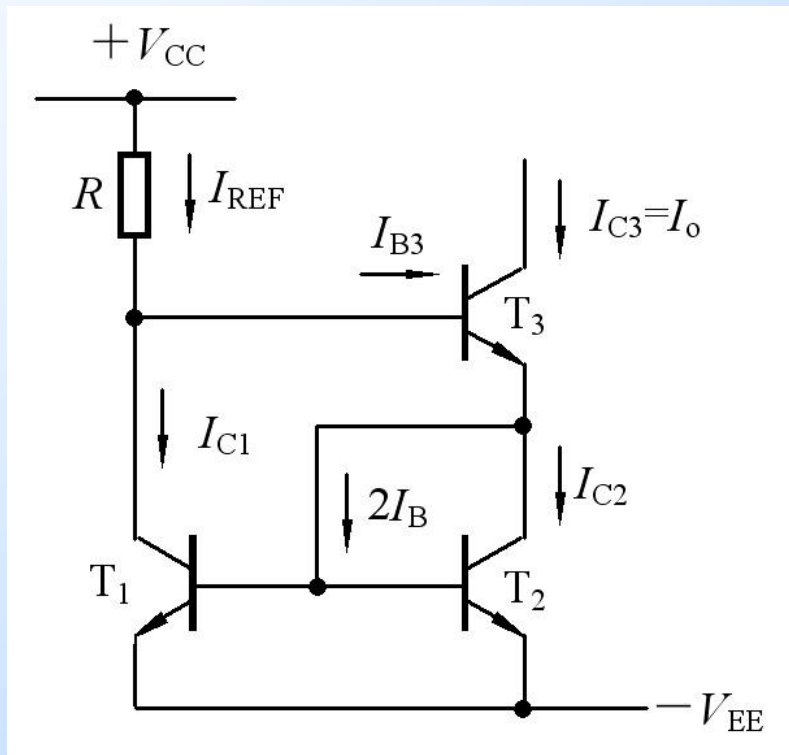
3. 高输出阻抗电流源

$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} - V_{\text{BE3}} - V_{\text{BE2}} + V_{\text{EE}}}{R}$$

$$I_o \approx I_{\text{C2}} = \frac{A_3}{A_1} \cdot I_{\text{REF}}$$

A_1 和 A_3 分别是 T_1 和 T_3 的相对结面积

动态输出电阻 r_o 远比微电流源的动态输出电阻为高



6.1.1 BJT电流源电路

4. 组合电流源

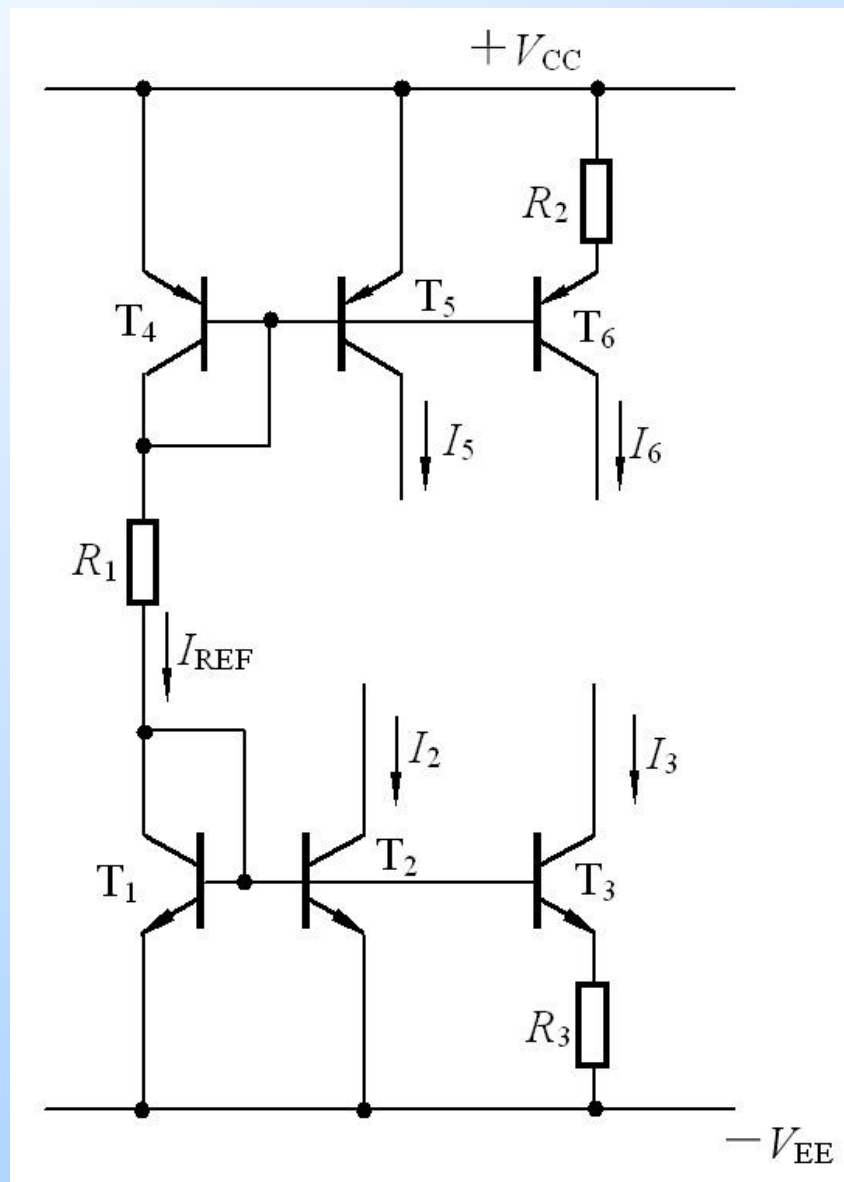
T_1 、 R_1 和 T_4 支路产生基准电流

I_{REF}

T_1 和 T_2 、 T_4 和 T_5 构成镜像电流源

T_1 和 T_3 、 T_4 和 T_6 构成了微电流源

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE1} - V_{EB4}}{R_1}$$



6.1.2 FET电流源

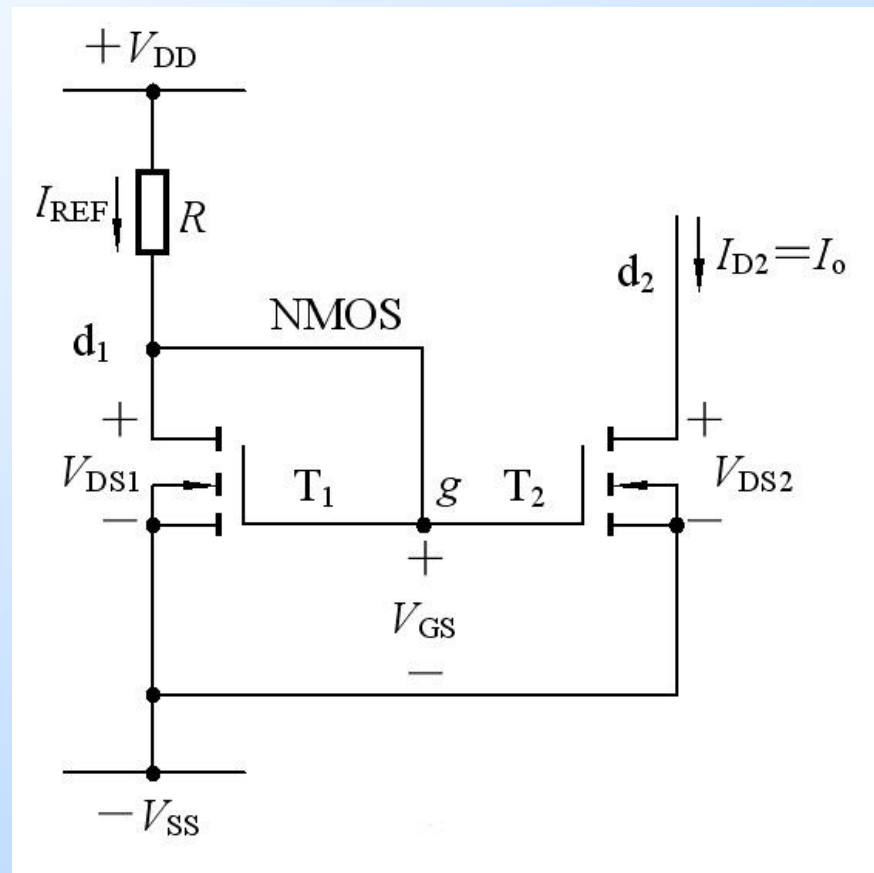
1. MOSFET镜像电流源

$$I_O = I_{D2} = I_{REF} = \frac{V_{DD} + V_{SS} - V_{GS}}{R}$$

当器件具有不同的宽长比时

$$I_O = \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} \cdot I_{REF} \quad (\lambda=0)$$

$$r_o = r_{ds2}$$



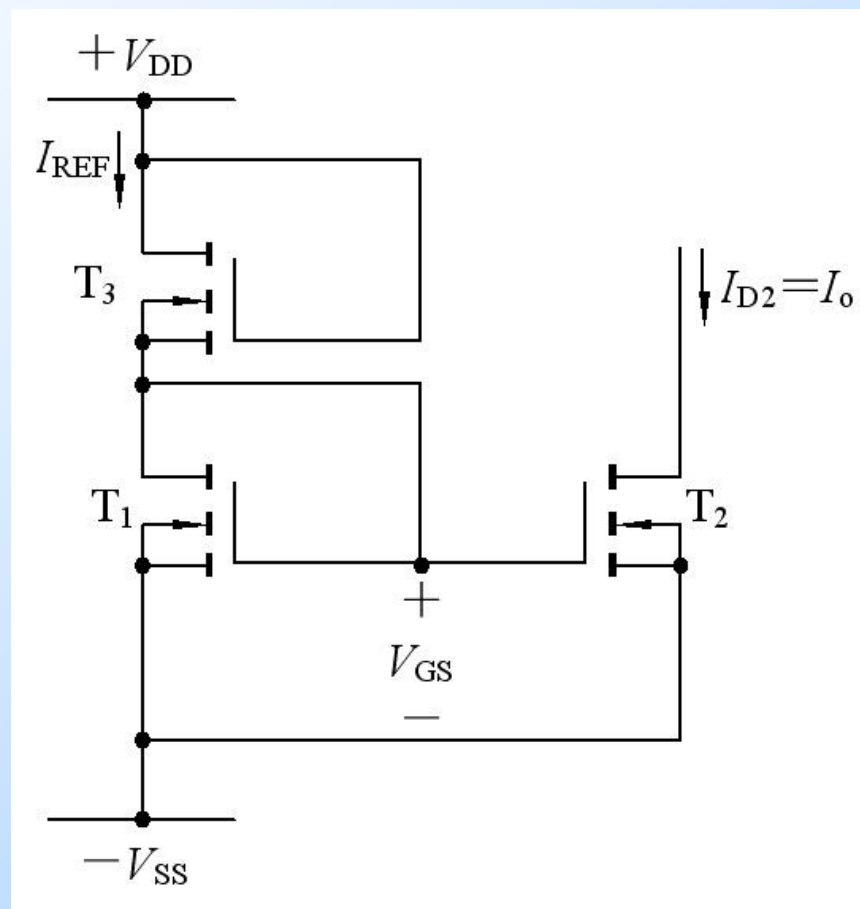
MOSFET基本镜像电路流

6.1.2 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源

用 T_3 代替 R ， $T_1 \sim T_3$ 特性相同，且工作在放大区，当 $\lambda=0$ 时，输出电流为

$$\begin{aligned} I_{D2} &= (W/L)_2 K'_{n2} (V_{GS2} - V_{T2})^2 \\ &= K_{n2} (V_{GS2} - V_{T2})^2 \end{aligned}$$



常用的镜像电流源



6.1.2 FET电流源

2. MOSFET多路电流源

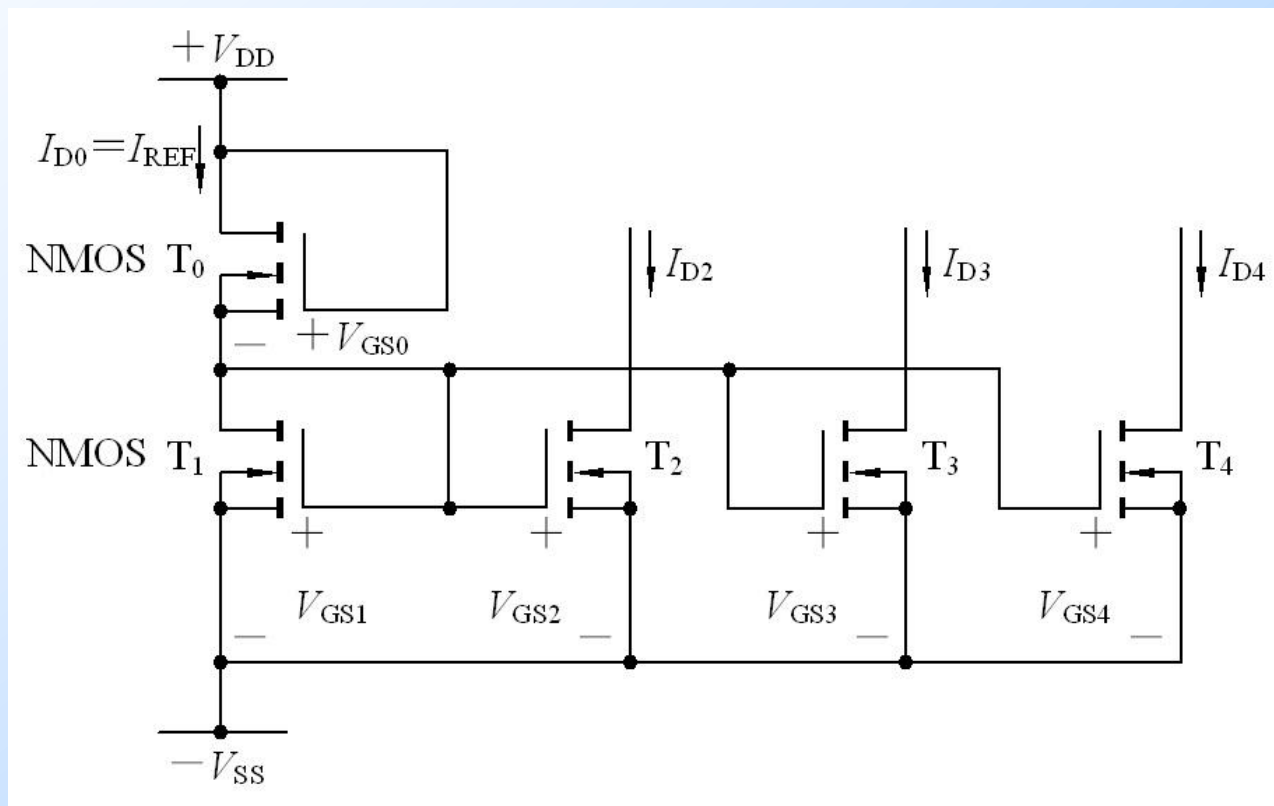
$$I_{REF} = I_{D0}$$

$$= K_{n0} (V_{GS0} - V_{T0})^2$$

$$I_{D2} = \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1} I_{REF}$$

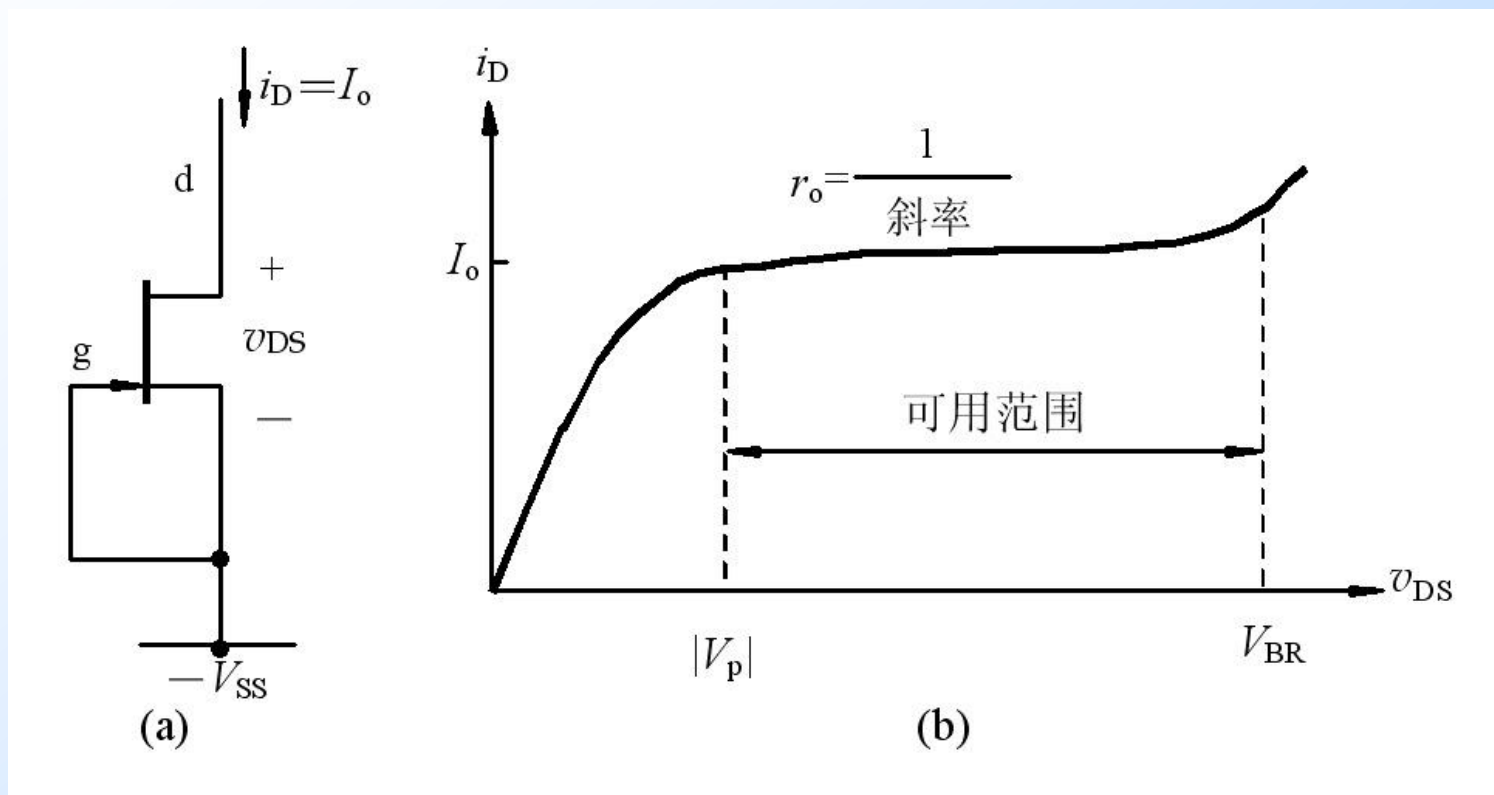
$$I_{D3} = \frac{W_3 / L_3}{W_1 / L_1} I_{REF}$$

$$I_{D4} = \frac{W_4 / L_4}{W_1 / L_1} I_{REF}$$



6.1.2 FET电流源

3. JFET电流源



(a) 电路

(b) 输出特性



6.2 差分式放大电路

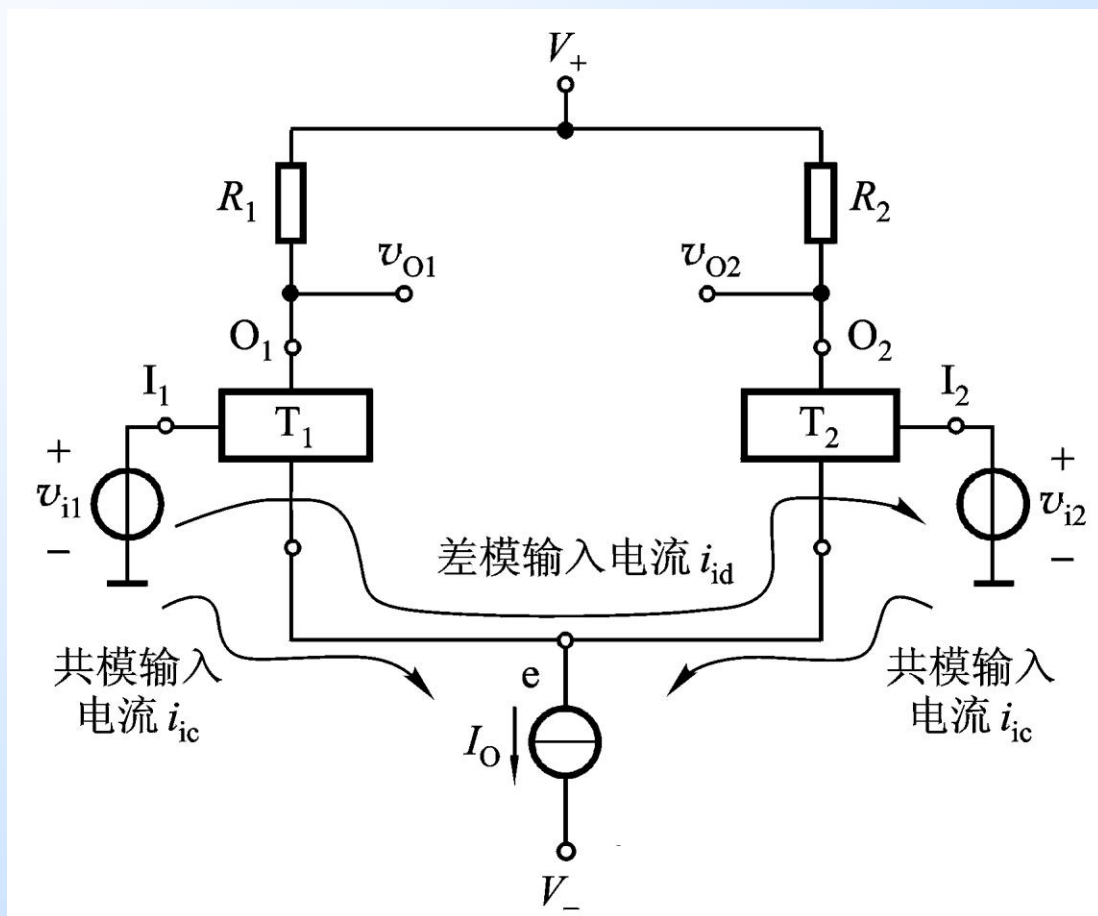
6.2.1 差分式放大电路的一般结构

6.2.2 射极耦合差分式放大电路

6.2.3 源极耦合差分式放大电路

6.2.1 差分式放大电路的一般结构

1. 用三端器件组成的差分式放大电路



6.2.1 差分式放大电路的

2. 有关概念

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad \text{差模信号}$$

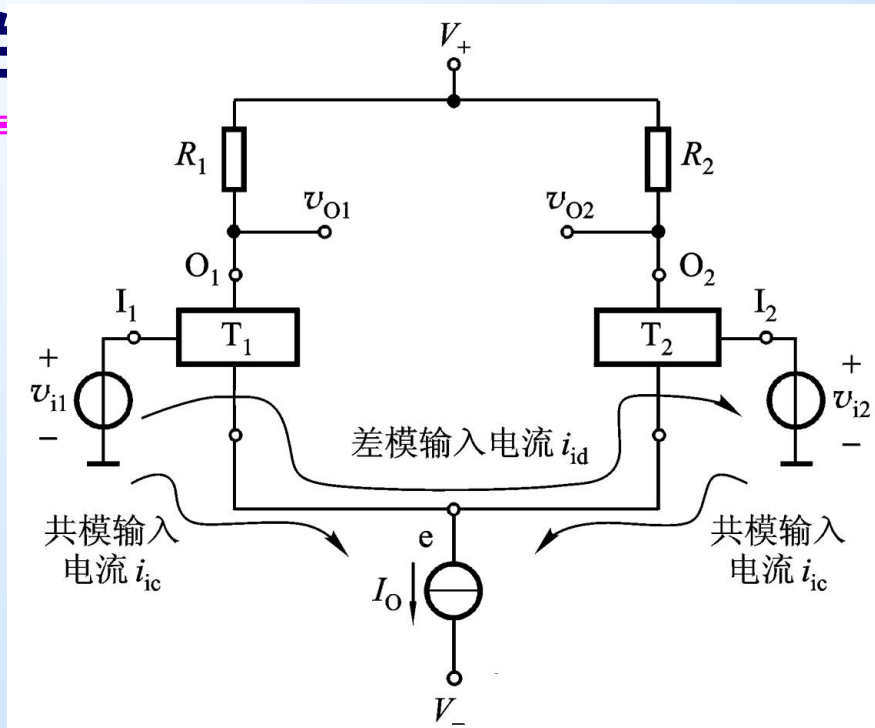
$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) \quad \text{共模信号}$$

$$A_{vd} = \frac{v'_o}{v_{id}} \quad \text{差模电压增益}$$

$$A_{vc} = \frac{v''_o}{v_{ic}} \quad \text{共模电压增益}$$

其中 v'_o —— 差模信号产生的输出

v''_o —— 共模信号产生的输出



总输出电压

$$v_o = v'_o + v''_o$$

$$= A_{vd} v_{id} + A_{vc} v_{ic}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad \text{共模抑制比}$$

反映抑制零漂能力的指标

6.2.1 差分式放大电路的

2. 有关概念

根据 $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$

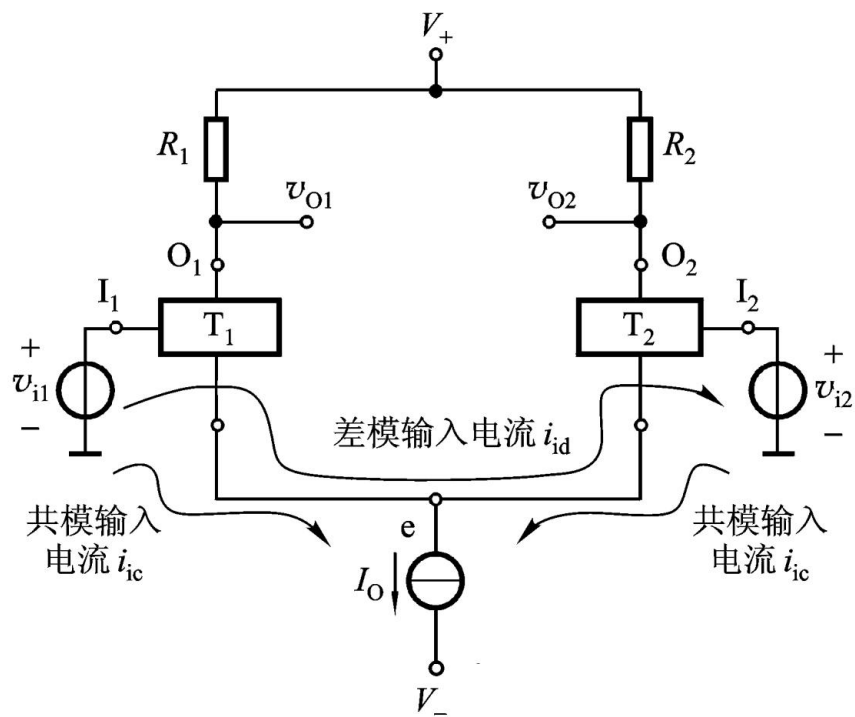
$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2})$$

有 $v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$

$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

共模信号相当于两个输入端信号中相同的部分

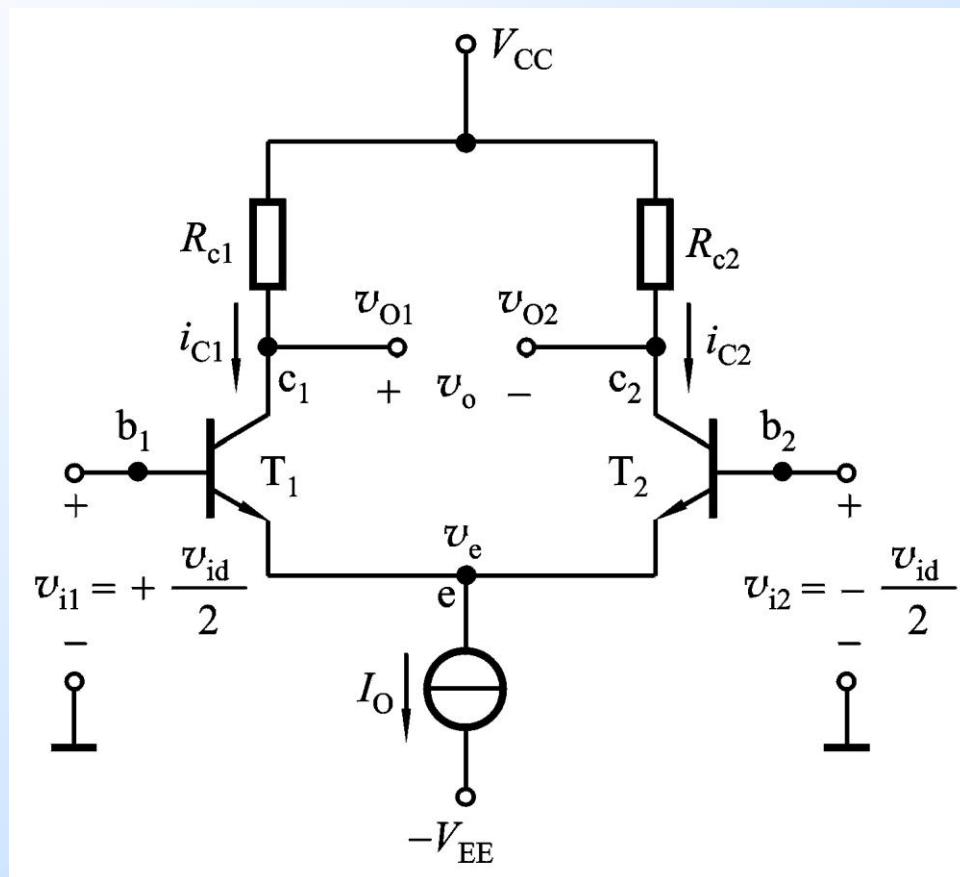
差模信号相当于两个输入端信号中不同的部分



两输入端中的共模信号大小相等，相位相同；差模信号大小相等，相位相反。

6.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理



6.2.2 射极耦合差分式放大电路

1. 电路组成及工作原理

静态

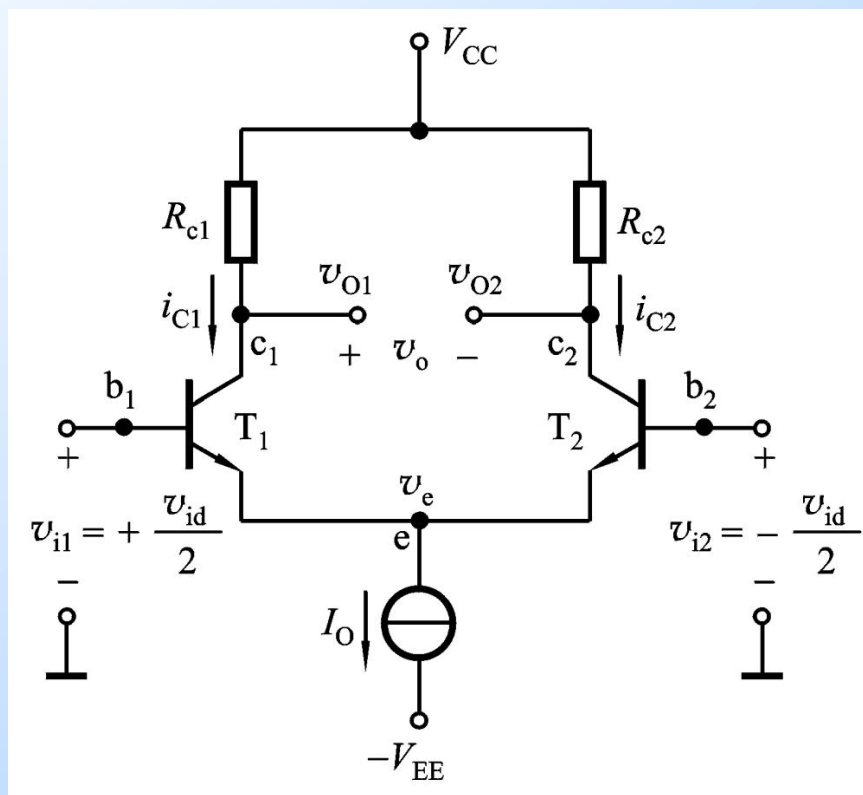
$$I_{C1} = I_{C2} = I_C = \frac{1}{2} I_O$$

$$V_{CE1} = V_{CE2}$$

$$= V_{CC} - I_C R_{c2} - V_E$$

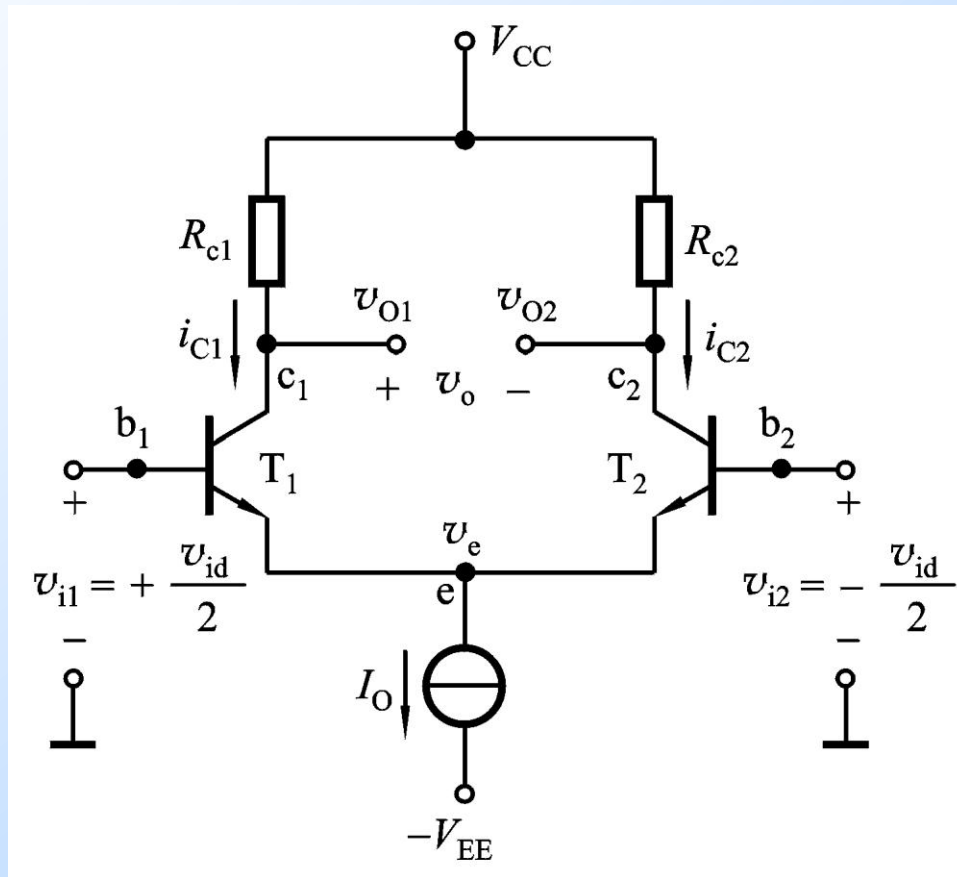
$$= V_{CC} - I_C R_{c2} - (-0.7V)$$

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_C}{\beta}$$



1. 电路组成及工作原理

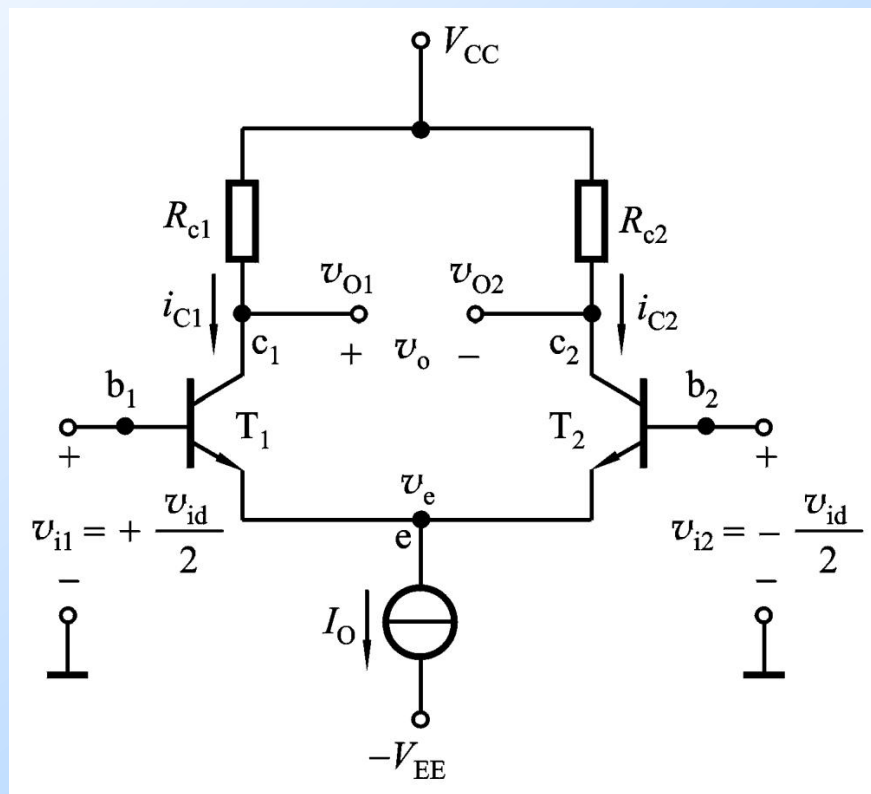
动态 仅输入差模信号， v_{i1} 和 v_{i2} 大小相等，相位相反。
 v_{O1} 和 v_{O2} 大小相等，相位相反。 $v_o = v_{O1} - v_{O2} \neq 0$ ，
信号被放大。



2. 抑制零点漂移原理

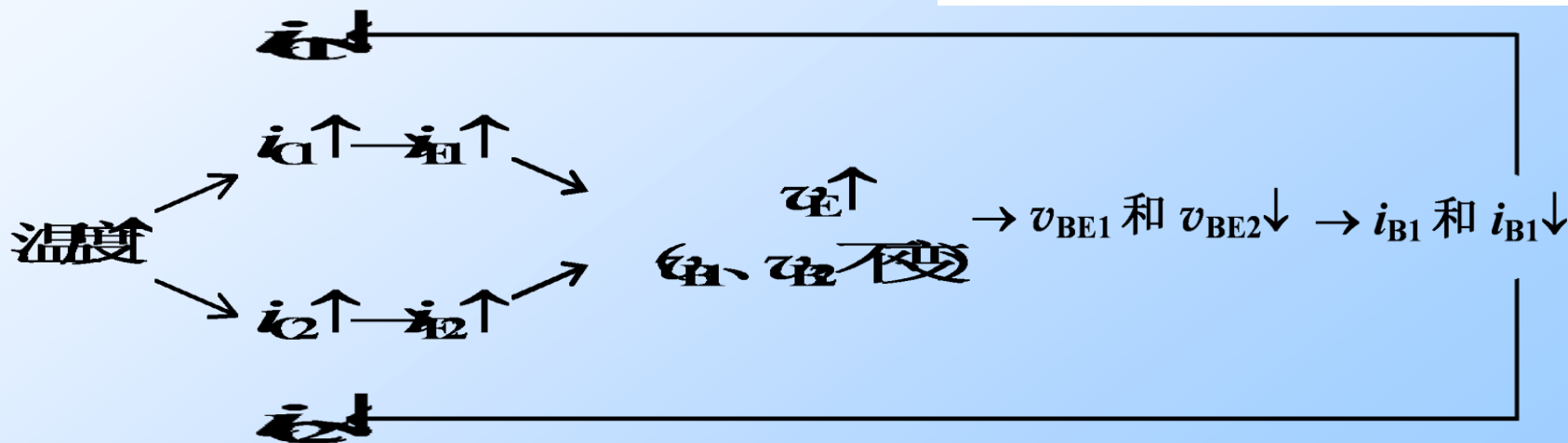
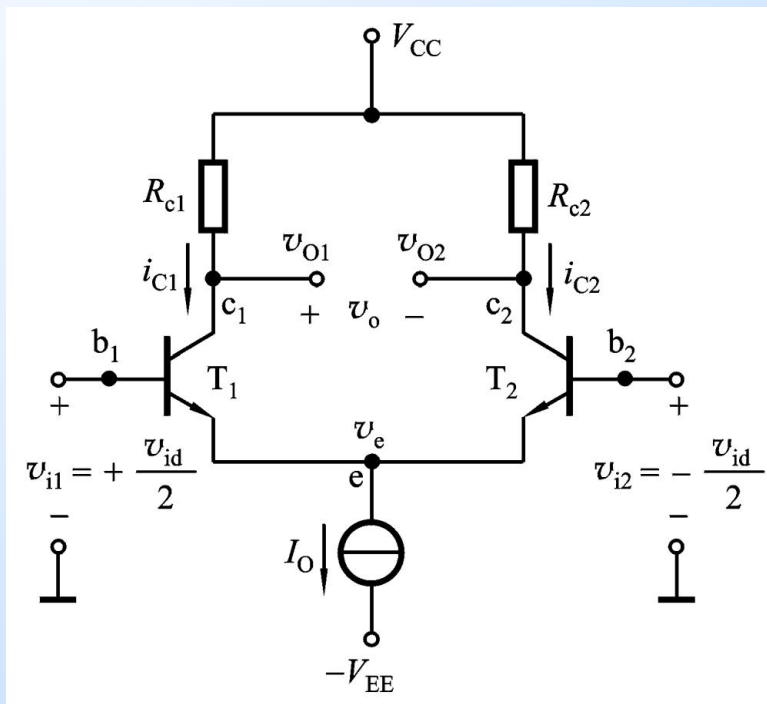
温度变化和电源电压波动，都将使集电极电流产生变化。且变化趋势是相同的，

其效果相当于在两个输入端加入了共模信号。



2. 抑制零点漂移原理

这一过程类似于分压式射极偏置电路的温度稳定过程。所以，即使电路处于单端输出方式时，仍有较强的抑制零漂能力。



差分式放大电路对共模信号有很强抑制作用

3. 主要指标计算

(1) 差模情况

<A> 双入、双出

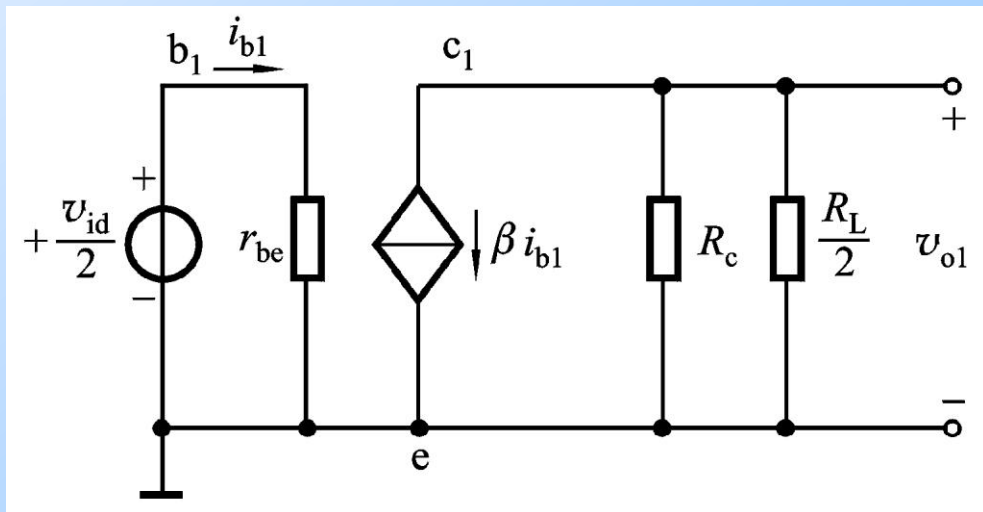
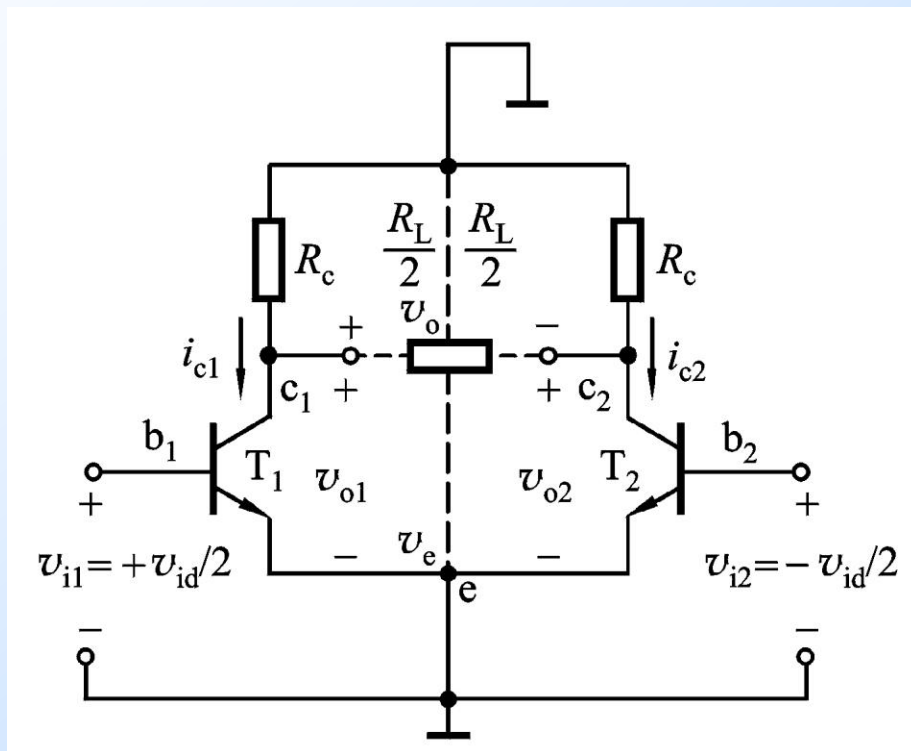
$$A_{vd} = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{i1} - v_{i2}}$$

$$= \frac{2v_{o1}}{2v_{i1}} = -\frac{\beta R_c}{r_{be}}$$

以双倍的元器件换取抑制零漂的能力

接入负载时

$$A_{vd} = -\frac{\beta(R_c // \frac{1}{2}R_L)}{r_{be}}$$



3. 主要指标计算

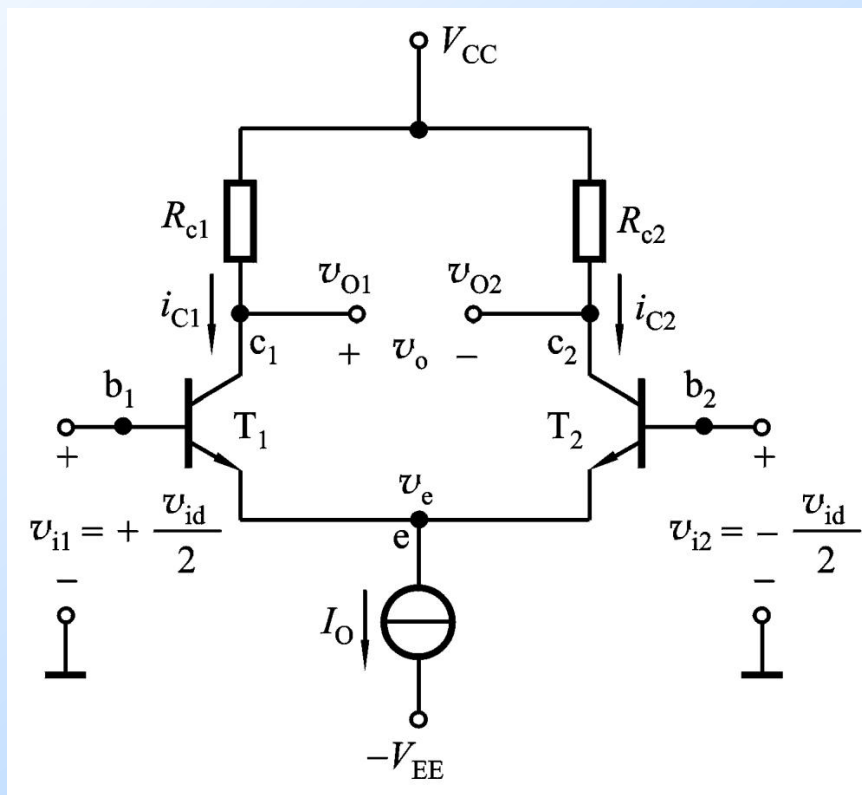
(1) 差模情况

〈B〉 双入、单出

$$\begin{aligned} A_{vd1} &= \frac{v_{o1}}{v_{id}} = \frac{v_{o1}}{2v_{i1}} \\ &= \frac{1}{2} A_{vd} = -\frac{\beta R_c}{2r_{be}} \end{aligned}$$

接入负载时

$$A_{vd} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{2r_{be}}$$



3. 主要指标计算

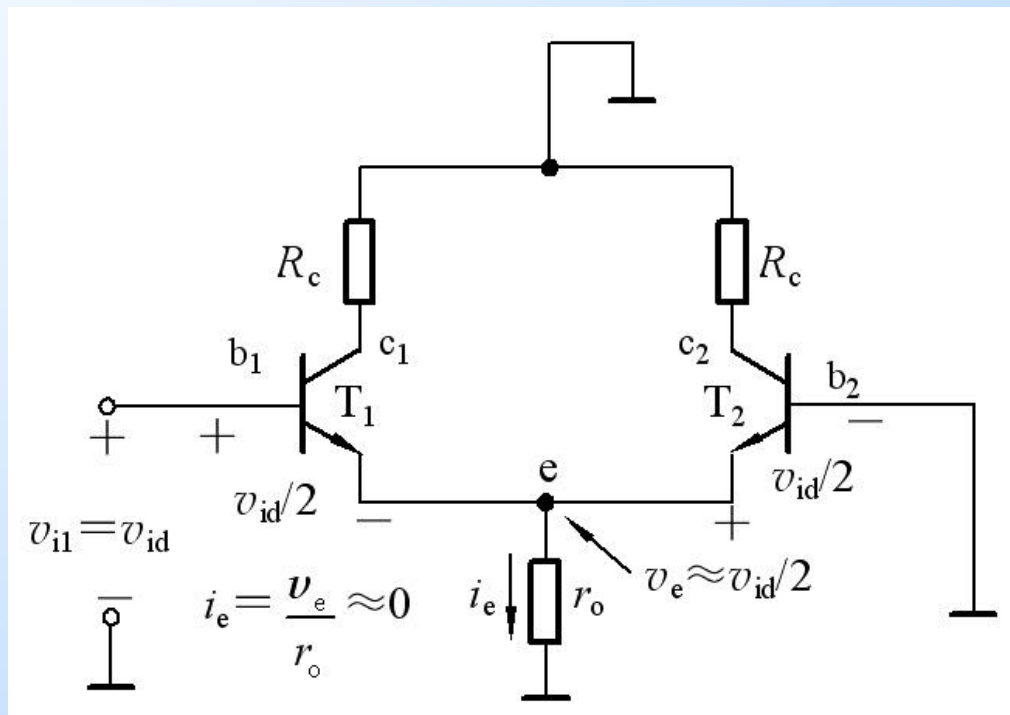
(1) 差模情况

<C> 单端输入

$$r_o \gg r_e$$

等效于双端输入

指标计算与双
端输入相同。



3. 主要指标计算

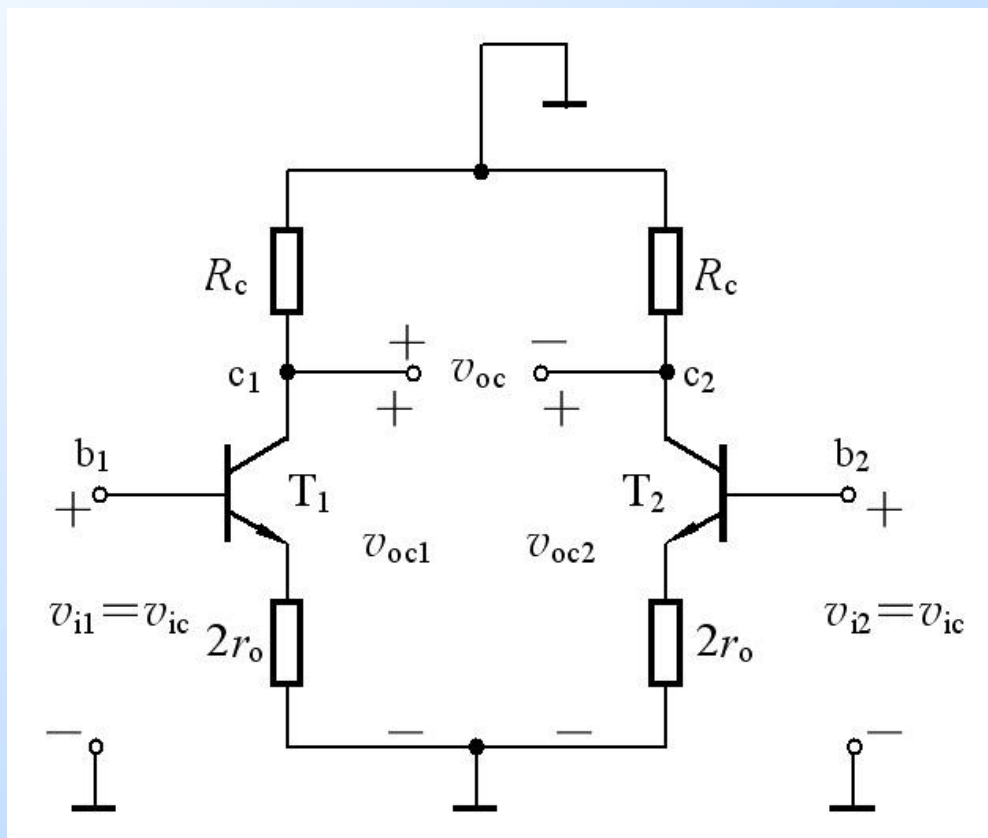
(2) 共模情况

〈A〉 双端输出

共模信号的输入使两管集电极电压有相同的变化。

$$\text{所以 } v_{oc} = v_{oc1} - v_{oc2} \approx 0$$

$$\text{共模增益 } A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx 0$$



3. 主要指标计算

(2) 共模情况

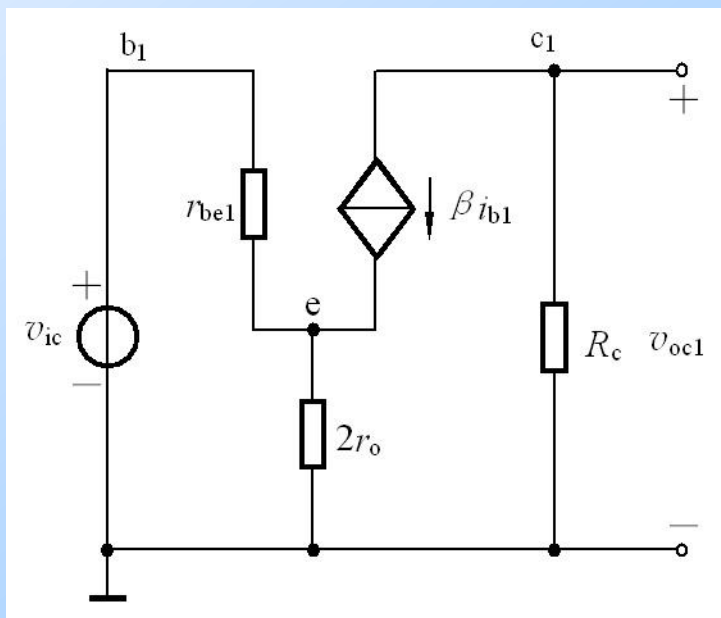
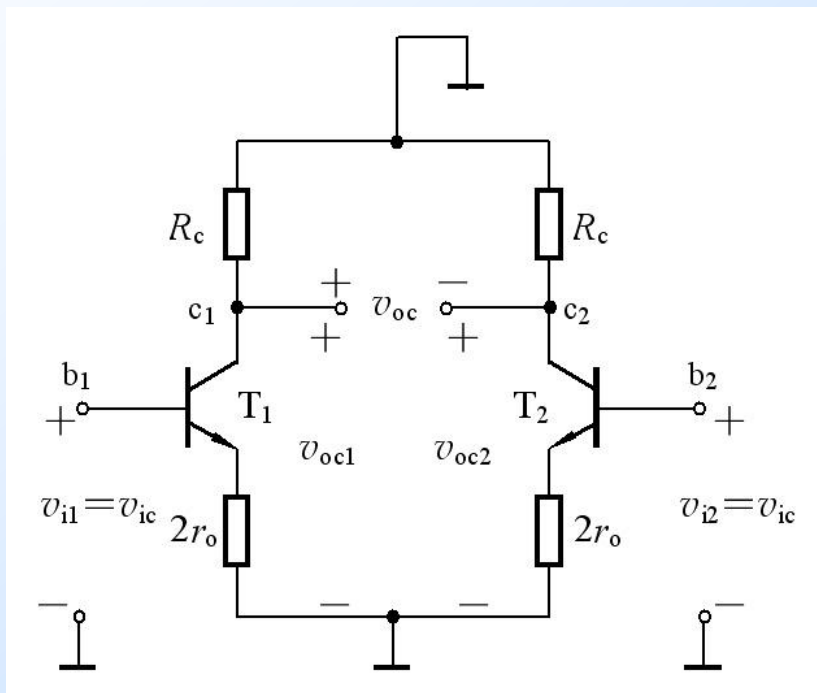
 单端输出

$$A_{vc1} = \frac{v_{oc1}}{v_{ic}} = \frac{v_{oc2}}{v_{ic}}$$

$$= \frac{-\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)2r_o} \approx -\frac{R_c}{2r_o}$$

$$r_o \uparrow \rightarrow A_{vc1} \downarrow$$

抑制零漂能力增强



(3) 共模抑制比

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \text{ dB}$$

双端输出，理想情况 $K_{\text{CMR}} = \infty$

单端输出 $K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd1}}{A_{vc1}} \right| \approx \frac{\beta \cdot r_o}{r_{be}}$

K_{CMR} 越大，抑制零漂能力越强

单端输出时的总输出电压 $v_{o1} = A_{vd1} v_{id} \left(1 + \frac{v_{ic}}{K_{\text{CMR}} v_{id}} \right)$

(4) 频率响应

高频响应与共射电路相同，低频可放大直流信号。

例 T_1 、 T_2 、 T_3 均为硅管，
 $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ， $\beta_3 = 80$ ，
 当 $v_i = 0$ 时， $v_o = 0V$ 。

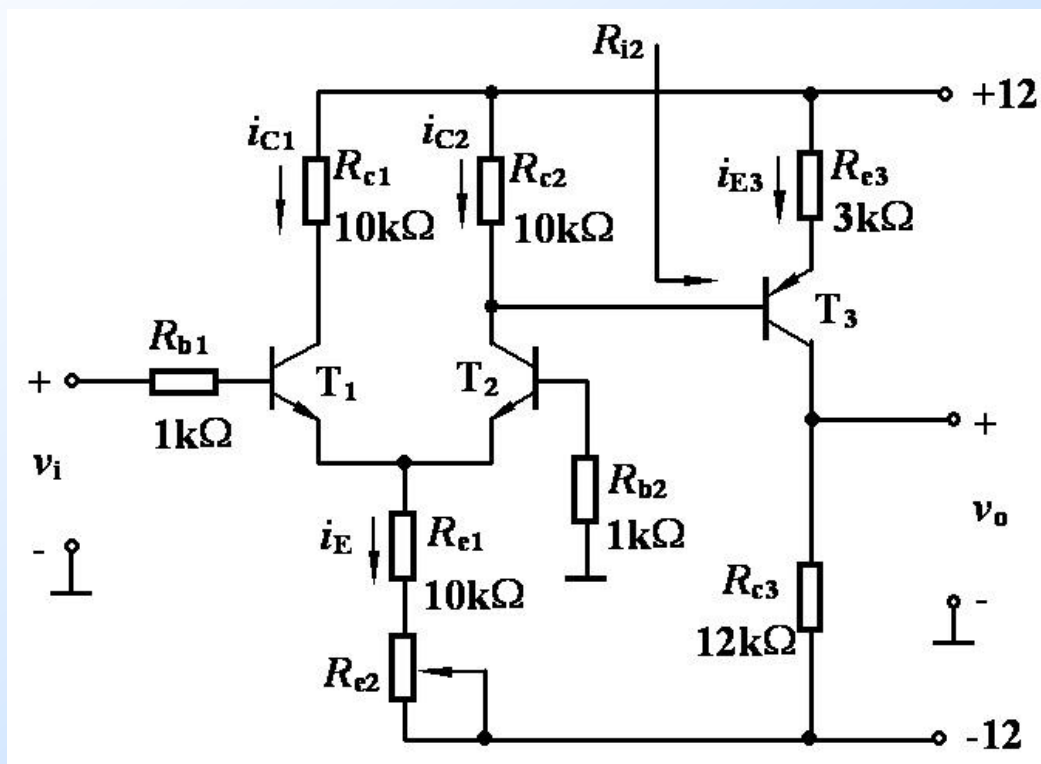
求：

(1) I_{C3} 、 I_{C2} 、 I_E 、 V_{CE3} 、 V_{CE2}
 及 R_{e2} 的值；

(2) $A_v = A_{vd2} \cdot A_{v2}$ ；

(3) 当 $v_i = 5mV$ 时， $v_o = ?$

(4) 当输出接一个 $12k\Omega$ 负载
 时的差模电压增益。



解： (1) 静态
$$I_{C3} = \frac{0 - (-12V)}{R_{c3}} = 1mA$$

$$V_{CE3} = V_{C3} - V_{E3} = 0 - (12V - I_{E3}R_{e3}) = -9V$$

$$I_{C2} = \frac{I_{E3} R_{e3} + V_{BE3}}{R_{c2}} = 0.37\text{mA}$$

$$V_{CE2} = 12\text{V} - I_{C2} R_{c2} - V_{E2}$$

$$= [12 - 0.37 \times 10 - (-0.7)]\text{V}$$

$$= 9\text{V}$$

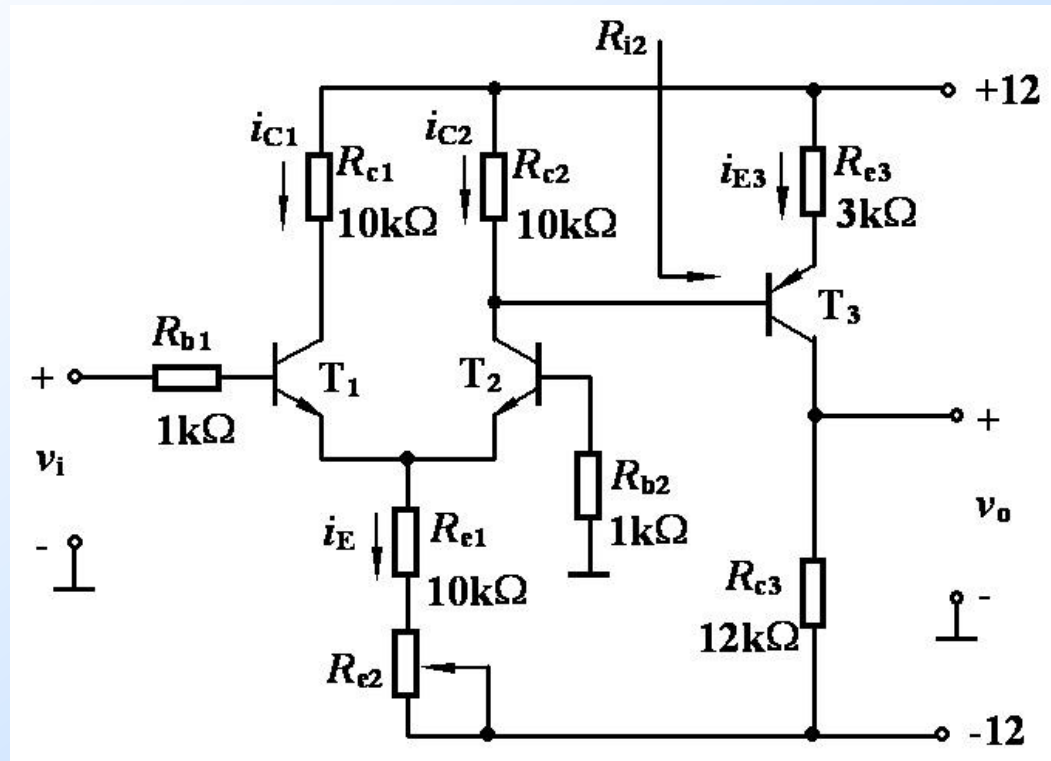
$$I_E = 2I_{E2} = 2I_{C2} = 0.74\text{mA}$$

$$R_{e2} = \frac{V_E - I_E R_{e1} - (-12)}{I_E}$$

$$= \left[\frac{-0.7 - 0.74 \times 10 + 12}{0.74} \right] \text{k}\Omega = 5.2\text{k}\Omega$$

(2) 电压增益 $r_{be3} = 200 + (1 + \beta_3) \frac{26\text{mV}}{I_{E3}} = 2.3\text{k}\Omega$

$$r_{be2} = 200 + (1 + \beta_2) \frac{26\text{mV}}{I_{E2}} = 3.78\text{k}\Omega$$



$$R_{i2} = r_{be3} + (1 + \beta_3)R_{e3} = 245.3\text{k}\Omega$$

$$A_{vd2} = \frac{\beta_2(R_{c2} // R_{i2})}{2(r_{be} + R_{b1})} \approx 50$$

$$A_{v2} = -\frac{\beta_3(R_{c3} // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta_3)R_{e3}} = -3.9$$

$$A_v = A_{vd2} \cdot A_{v2} = -195$$

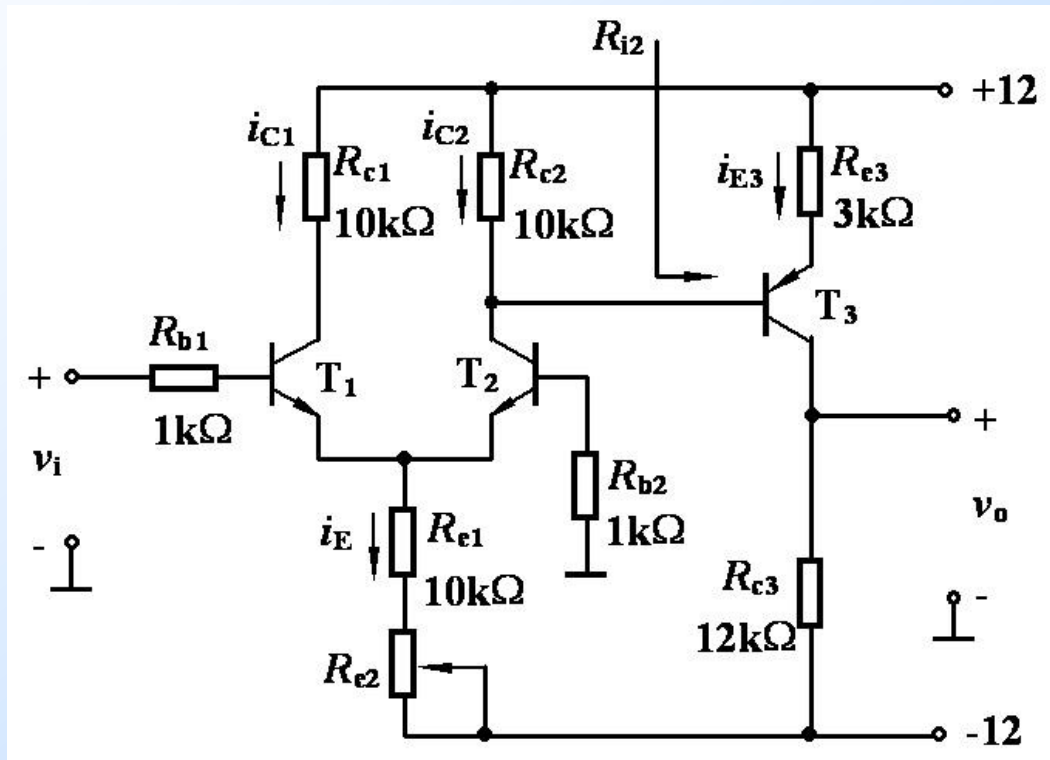
(3) 差分电路的共模增益

$$A_{vc2} = -\frac{\beta_2(R_{c2} // R_{i2})}{r_{be} + R_{b1} + (1 + \beta_2)2(R_{e1} + R_{e2})} \approx -0.3$$

共模输入电压 $v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) = \frac{1}{2}(5\text{mV} + 0) = 2.5\text{mV}$

$$v_O = v_{O2} \cdot A_{v2} = (A_{vd2} \cdot v_{id} + A_{vc2} \cdot v_{ic}) \cdot A_{v2} = [50 \times 5 + (-0.3) \times 2.5] \times (-3.9) \approx -972\text{mV}$$

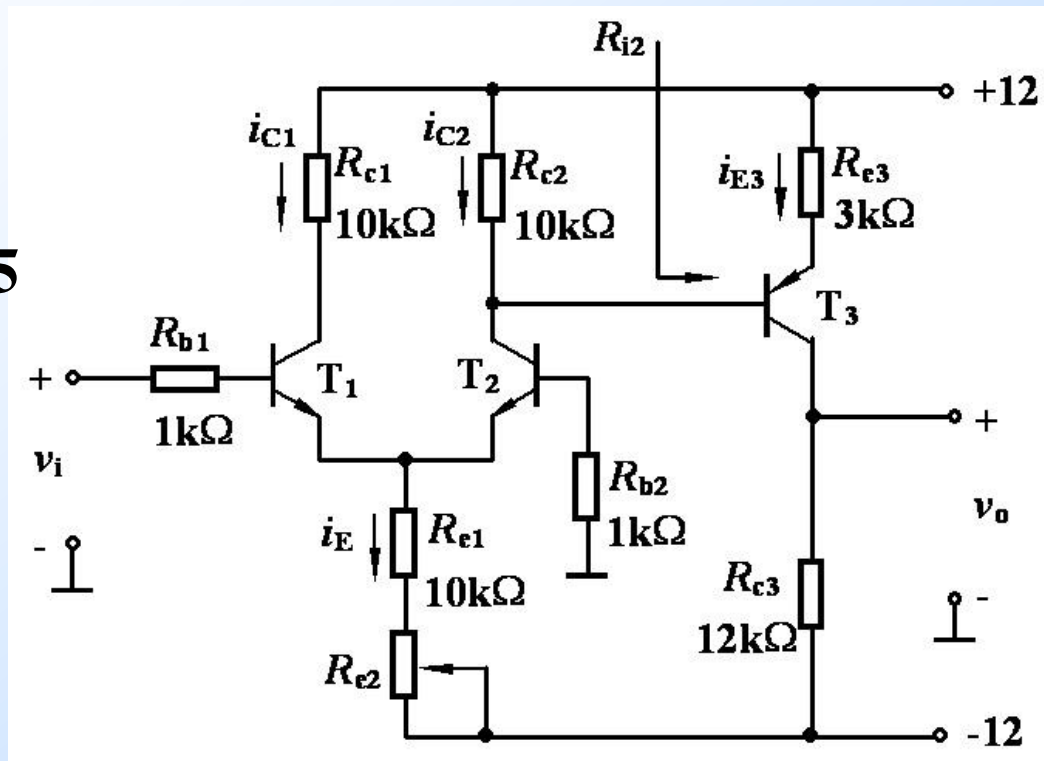
不计共模输出电压时 $v_O = -975\text{mV}$



(4) $R_L = 12\text{k}\Omega$ 时

$$A_{v2} = -\frac{\beta_3 (R_{c3} // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta_3) R_{e3}} = -1.95$$

$$A_v = A_{vd2} \cdot A_{v2} = -97.5$$



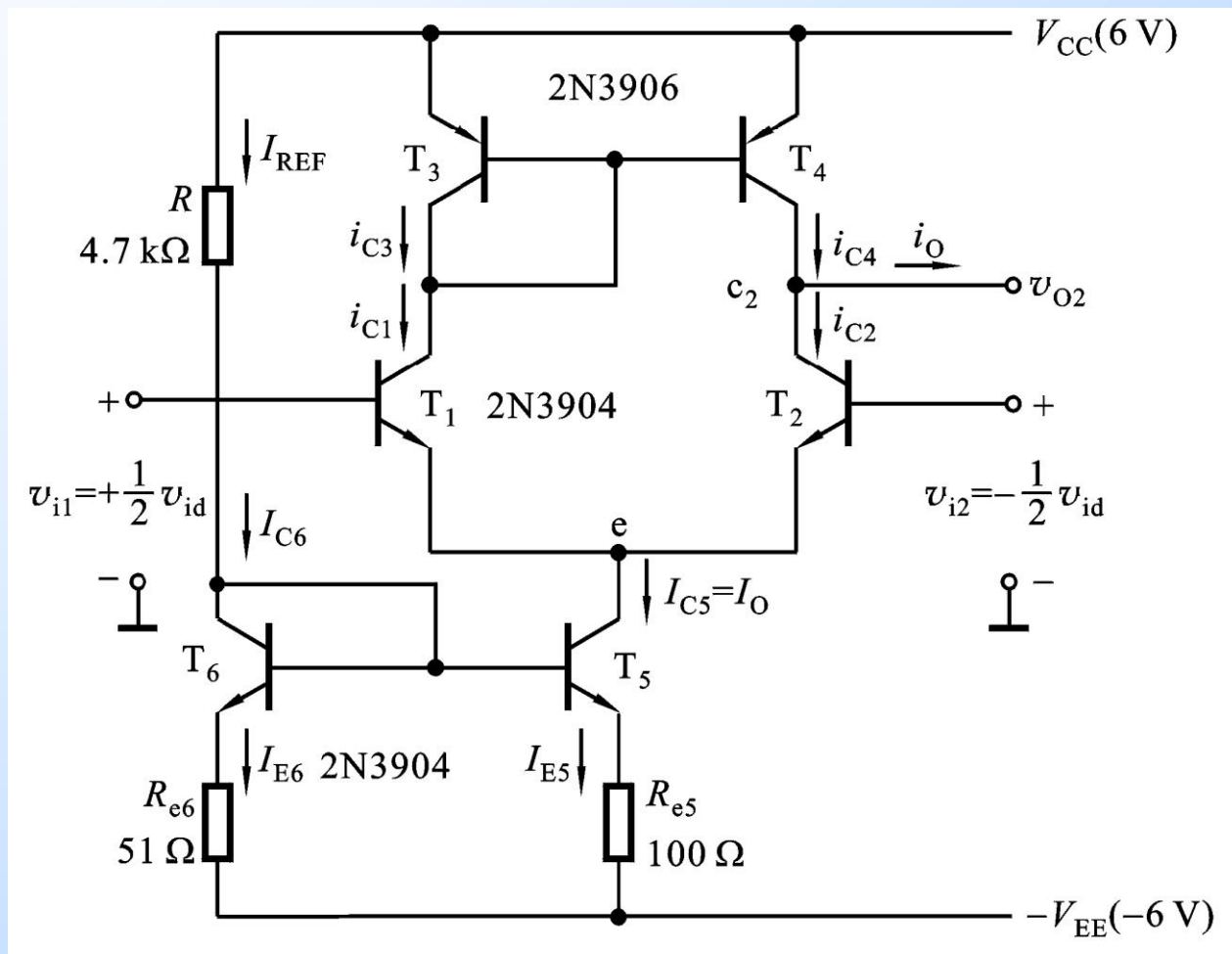
4. 带有源负载的射极耦合差分式放大电路

静态

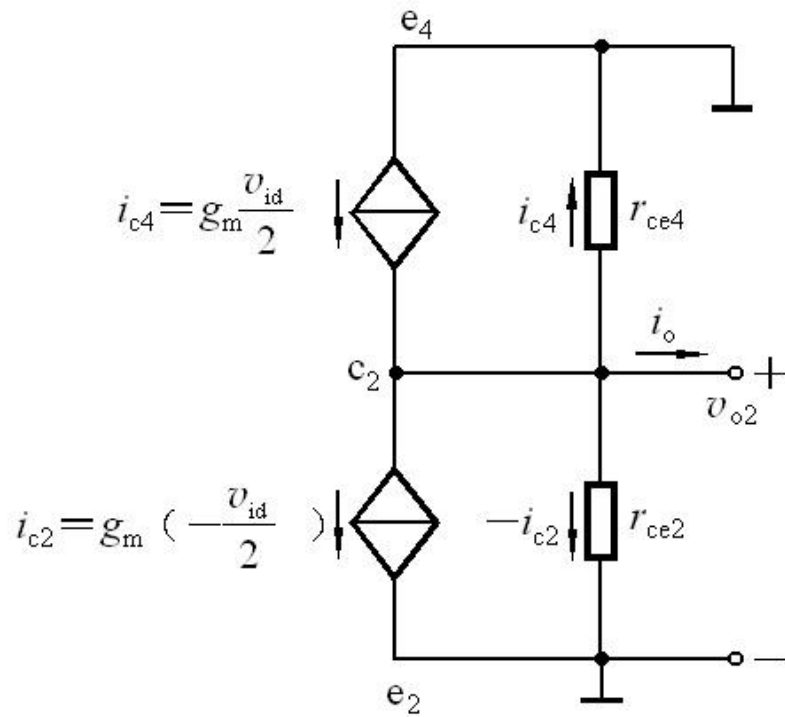
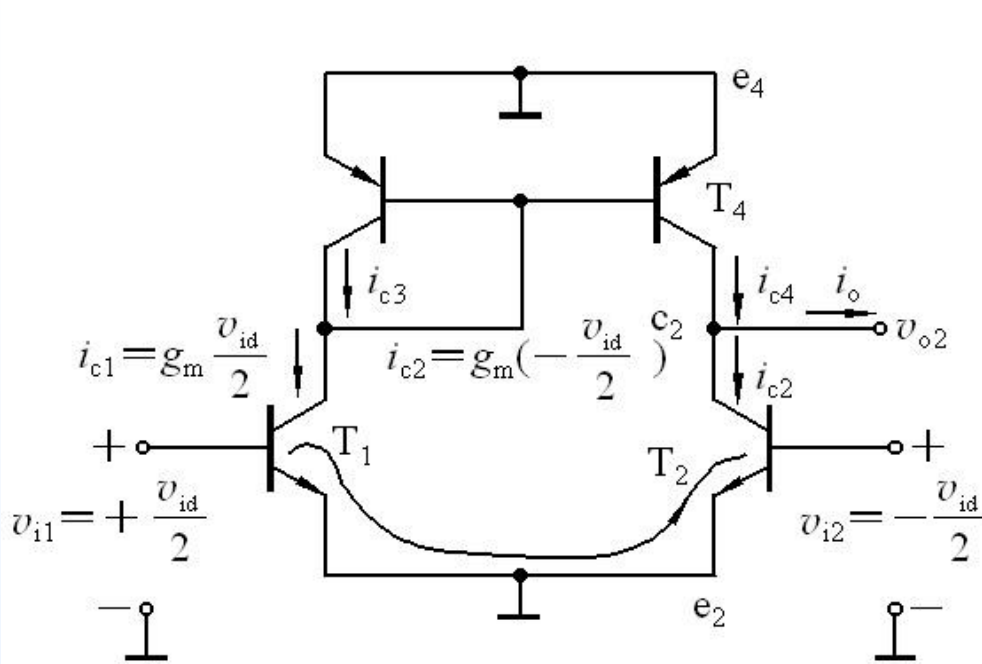
$$I_{E6} \approx I_{REF}$$

$$= \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE6}}{R + R_{e6}}$$

$$I_O = I_{E5} \approx \frac{R_{E6}}{R_{E5}} \cdot I_{E6}$$



4. 带有源负载的射极耦合差分式放大电路



差模电压增益
(负载开路)

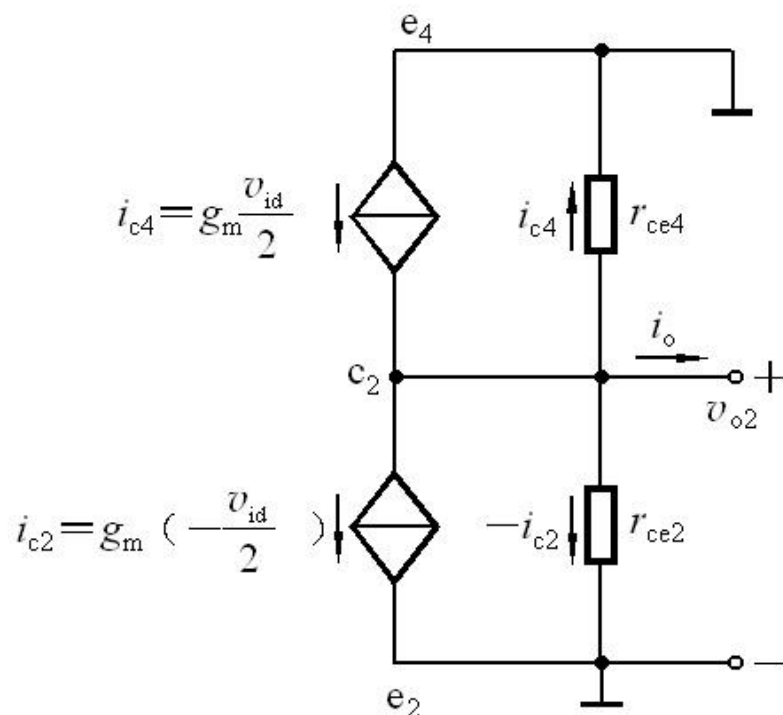
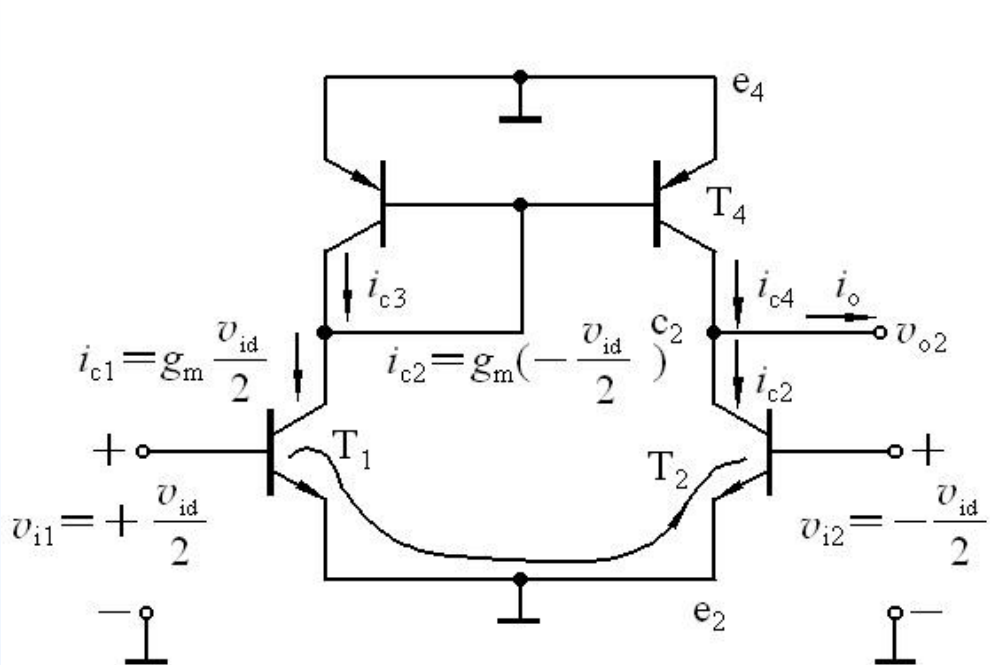
$$i_{c4} - i_{c2} - \frac{v_{o2}}{r_{ce2}} - \frac{v_{o2}}{r_{ce4}} = 0 \quad \frac{\beta v_{id}}{2r_{be}} - \left(-\frac{\beta v_{id}}{2r_{be}}\right) - \frac{v_{o2}}{r_{ce2}} - \frac{v_{o2}}{r_{ce4}} = 0$$

则

$$A_{vd2} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{\beta(r_{ce2} // r_{ce4})}{r_{be}}$$

单端输出的电压增益接近于双端输出的电压增益

4. 带有源负载的射极耦合差分式放大电路



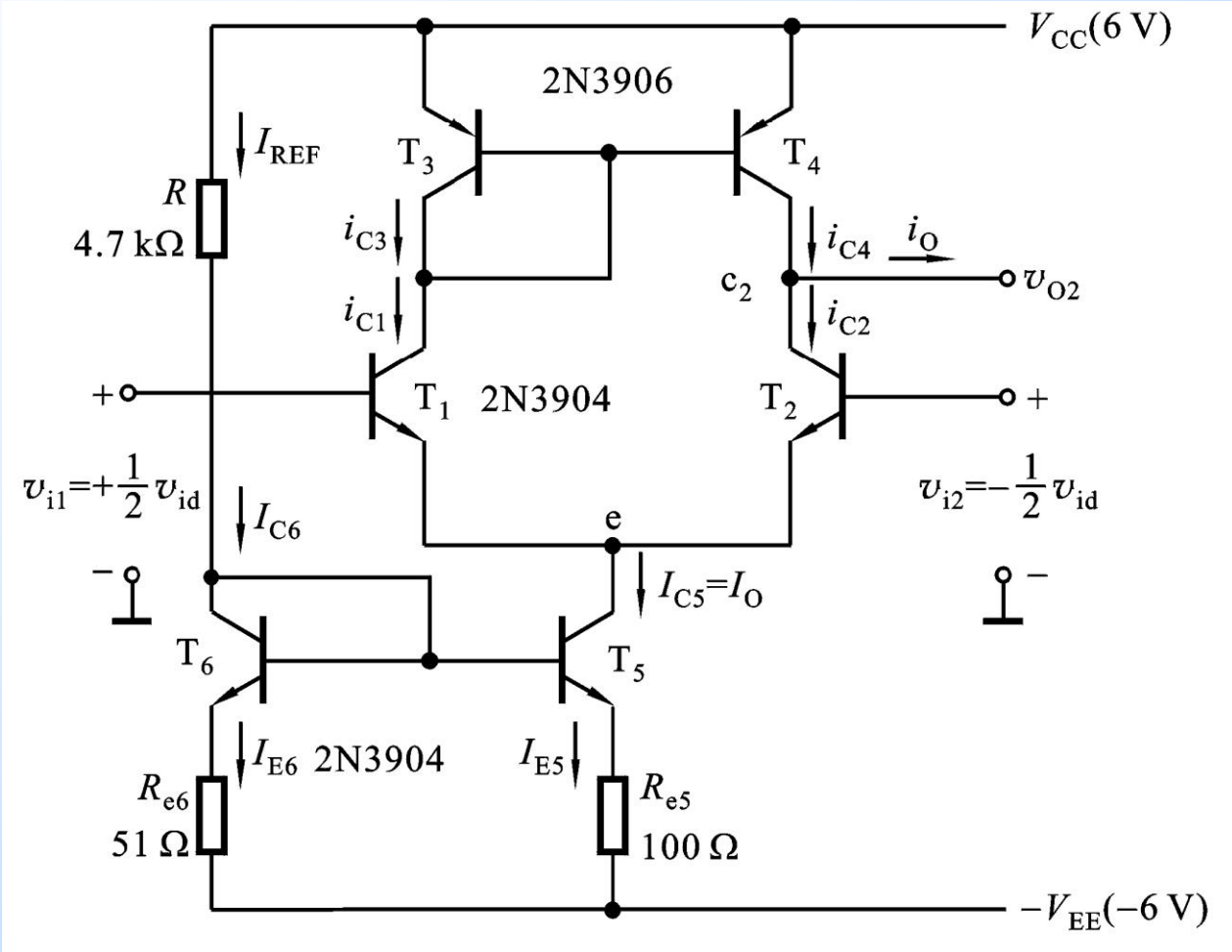
差模输入电阻 $R_{id} = 2r_{be}$

输出电阻 $R_o = r_{ce2} // r_{ce4}$

4. 带有源负载的射极耦合差分式放大电路

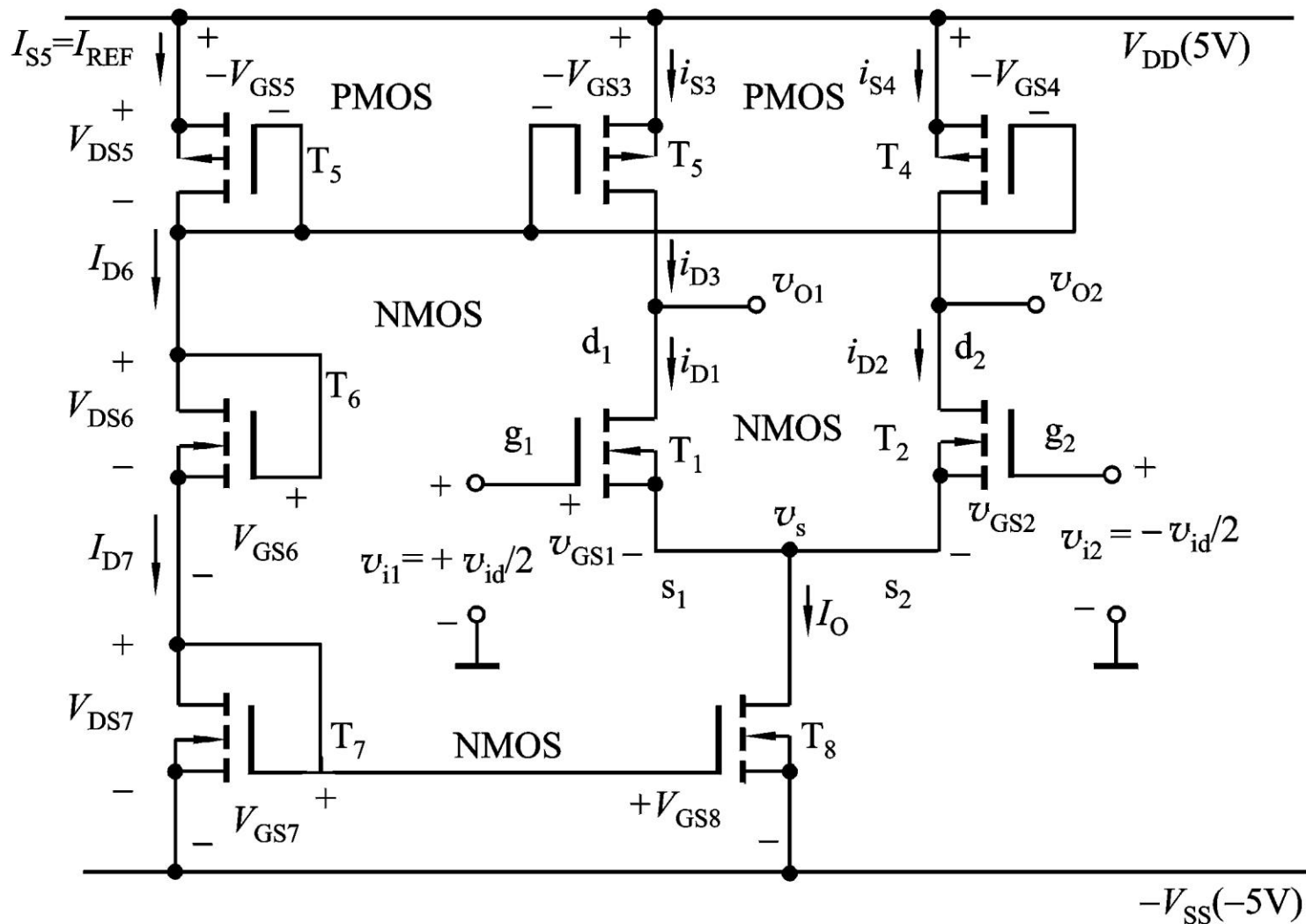
共模输入电阻

$$R_{ic} = r_{be} + 2(1 + \beta)r_{o5}$$



6.2.3 源极耦合差分式放大电路

1. CMOS差分式放大电路



6.2.3 源极耦合差分式放大电路

1. CMOS差分式放大电路

双端输出差模电压增益

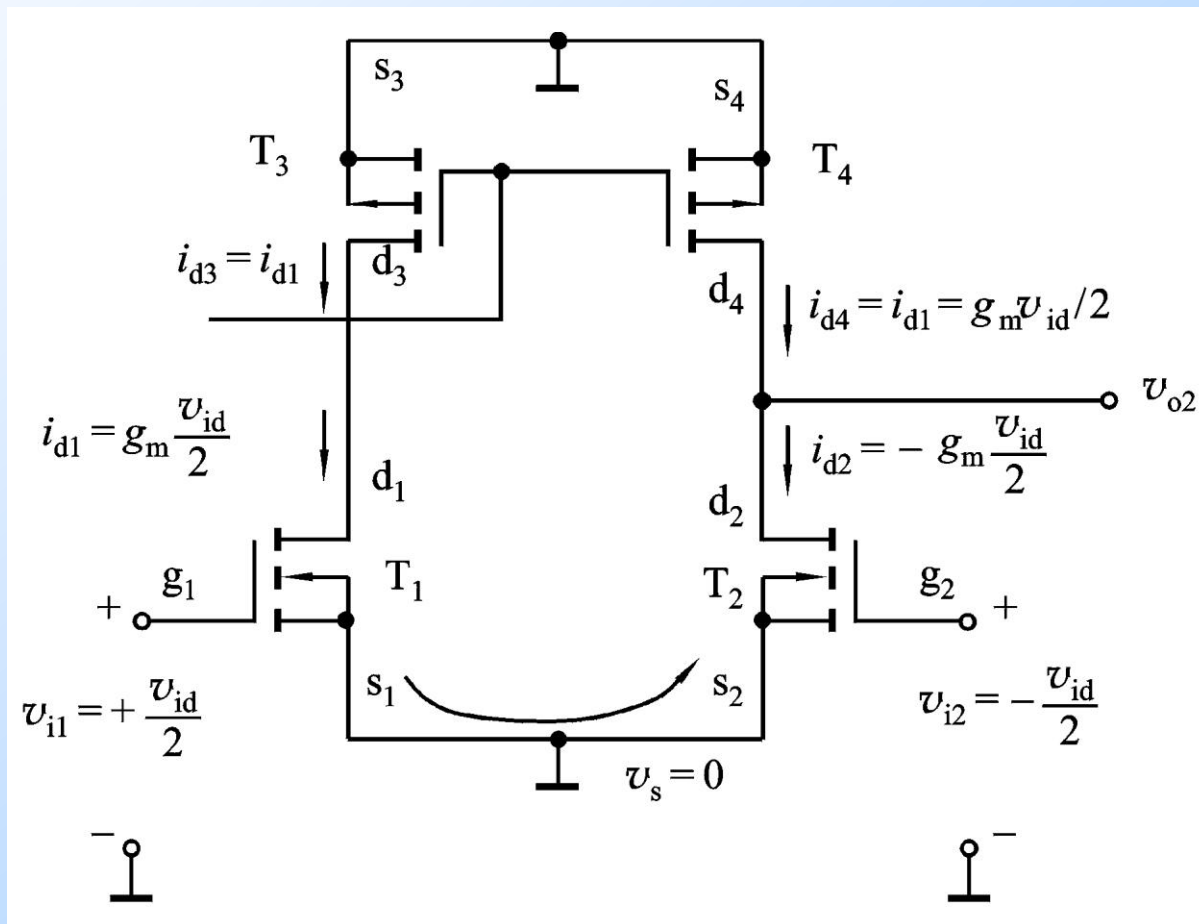
$$A_{vd} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{i1} - v_{i2}} = \frac{2v_{o1}}{v_{id}}$$

而:

$$\begin{aligned} v_{o1} &= -g_m v_{i1} (r_{o3} // r_{o1}) \\ &= -g_m \frac{v_{id}}{2} (r_{o3} // r_{o1}) \end{aligned}$$

所以:

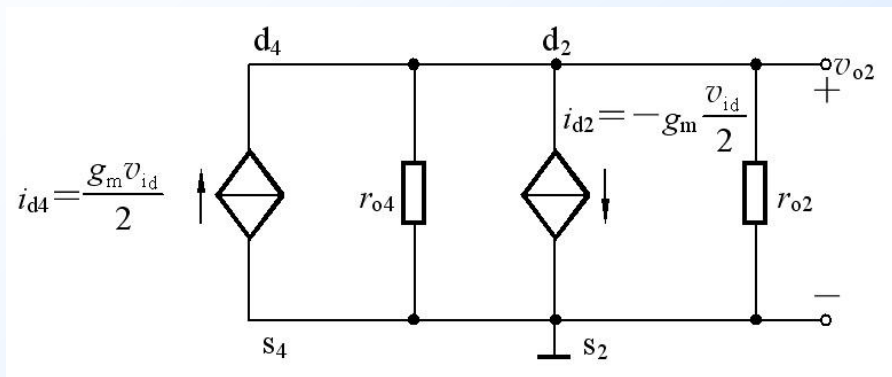
$$\begin{aligned} A_{vd} &= -g_m (r_{o3} // r_{o1}) \\ &= -g_m (r_{ds3} // r_{ds1}) \end{aligned}$$



6.2.3 源极耦合差分式放大电路

1. CMOS差分式放大电路

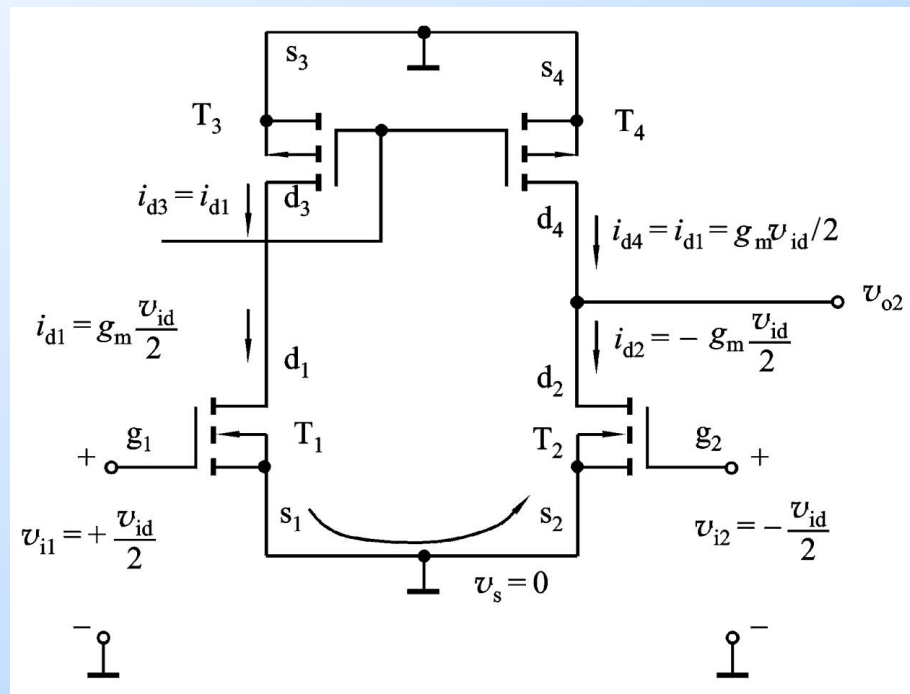
单端输出差模电压增益



$$v_{o2} = (i_{d4} - i_{d2})(r_{o2} // r_{o4})$$

$$= \left[g_m \frac{v_{id}}{2} - \left(-g_m \frac{v_{id}}{2} \right) \right] (r_{o2} // r_{o4})$$

$$= g_m v_{id} (r_{o2} // r_{o4})$$



$$A_{vd} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = g_m (r_{o2} // r_{o4})$$

与双端输出相同

6.3 差分式放大电路的传输特性

根据 $i_E = I_{ES} e^{v_{BE}/V_T}$

$$i_{C1} = i_{E1}, \quad i_{C2} = i_{E2}$$

$$v_{BE1} = v_{i1} = v_{id}/2$$

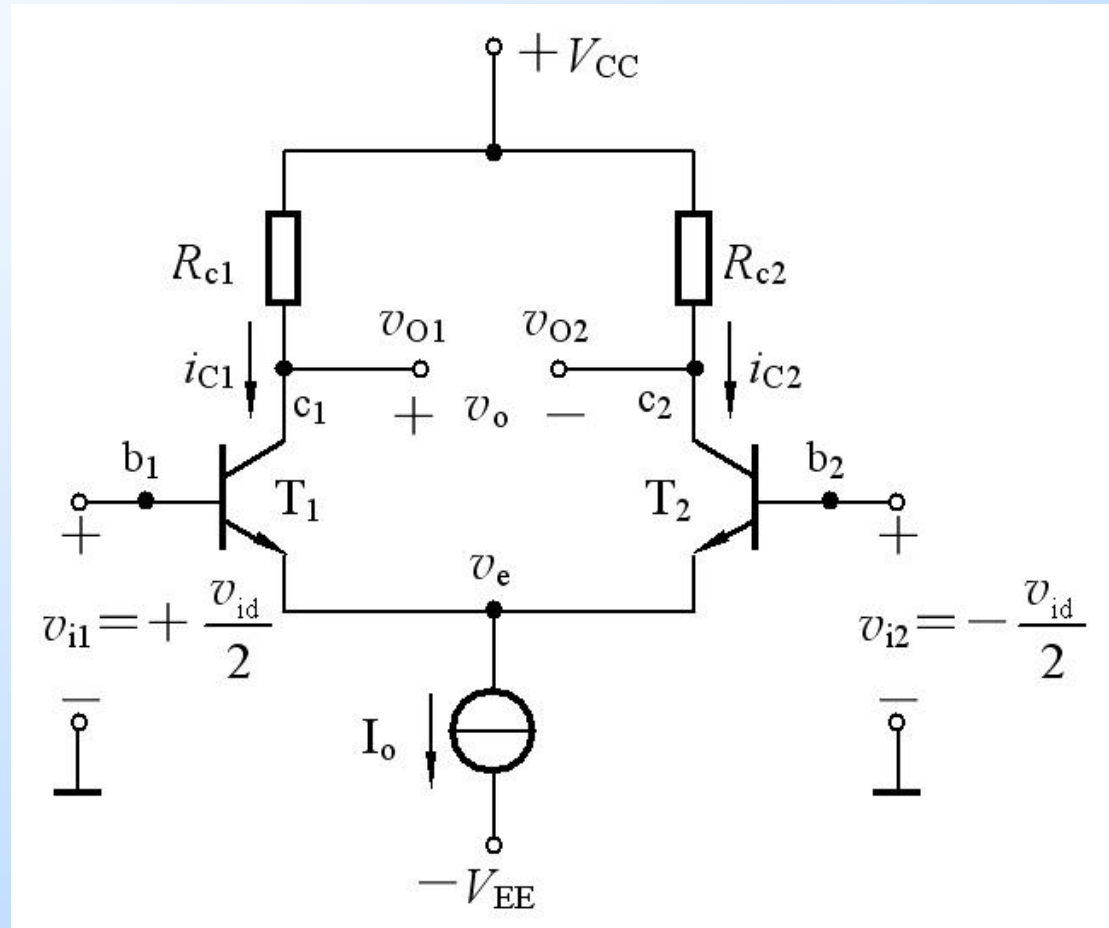
$$v_{BE2} = v_{i2} = -v_{id}/2$$

又 $v_{O1} = V_{CC} - i_{C1}R_{c1}$

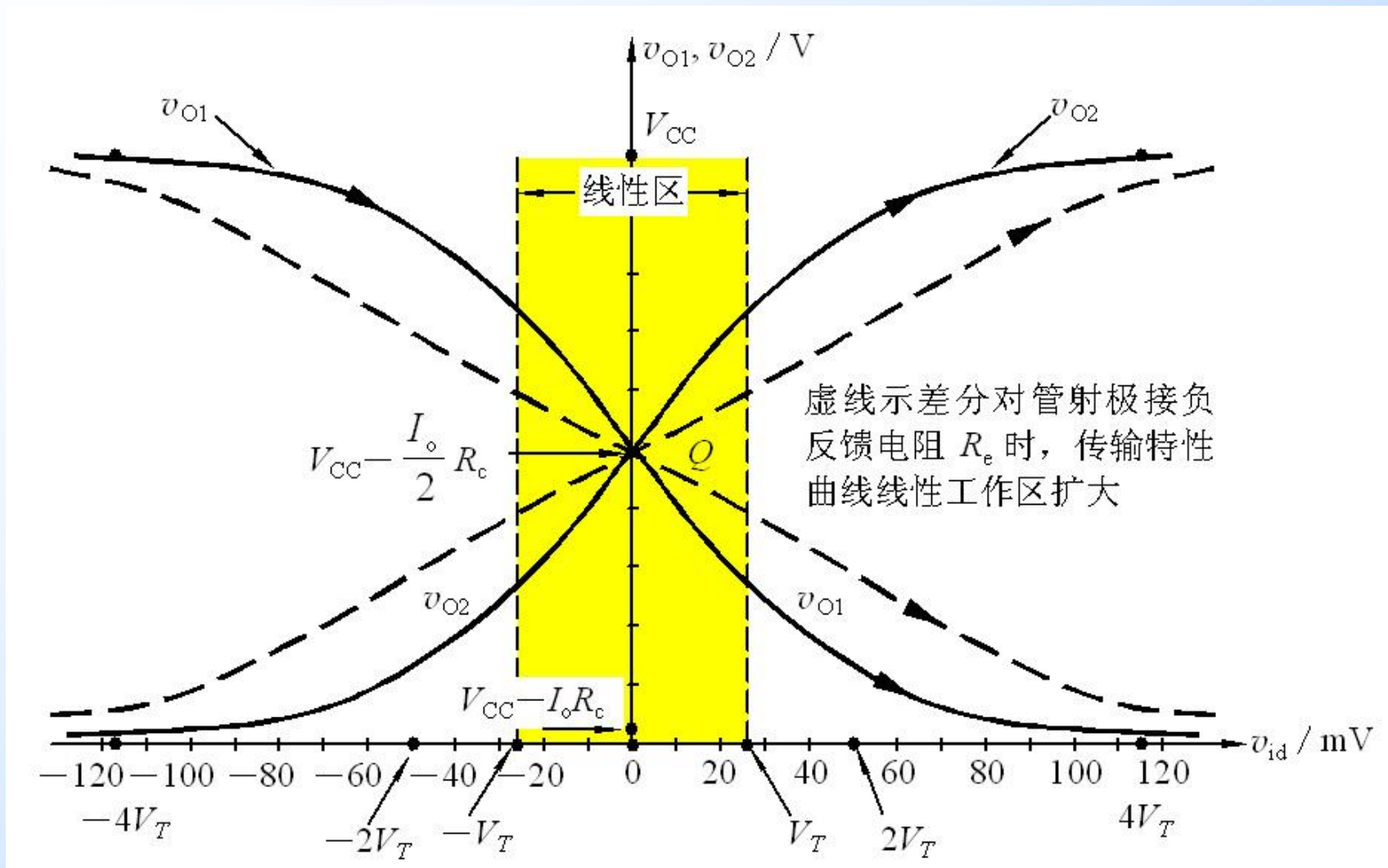
$$v_{O2} = V_{CC} - i_{C2}R_{c2}$$

可得传输特性曲线

$$v_{O1}, v_{O2} = f(v_{id})$$



$v_{O1}, v_{O2} = f(v_{id})$ 的传输特性曲线





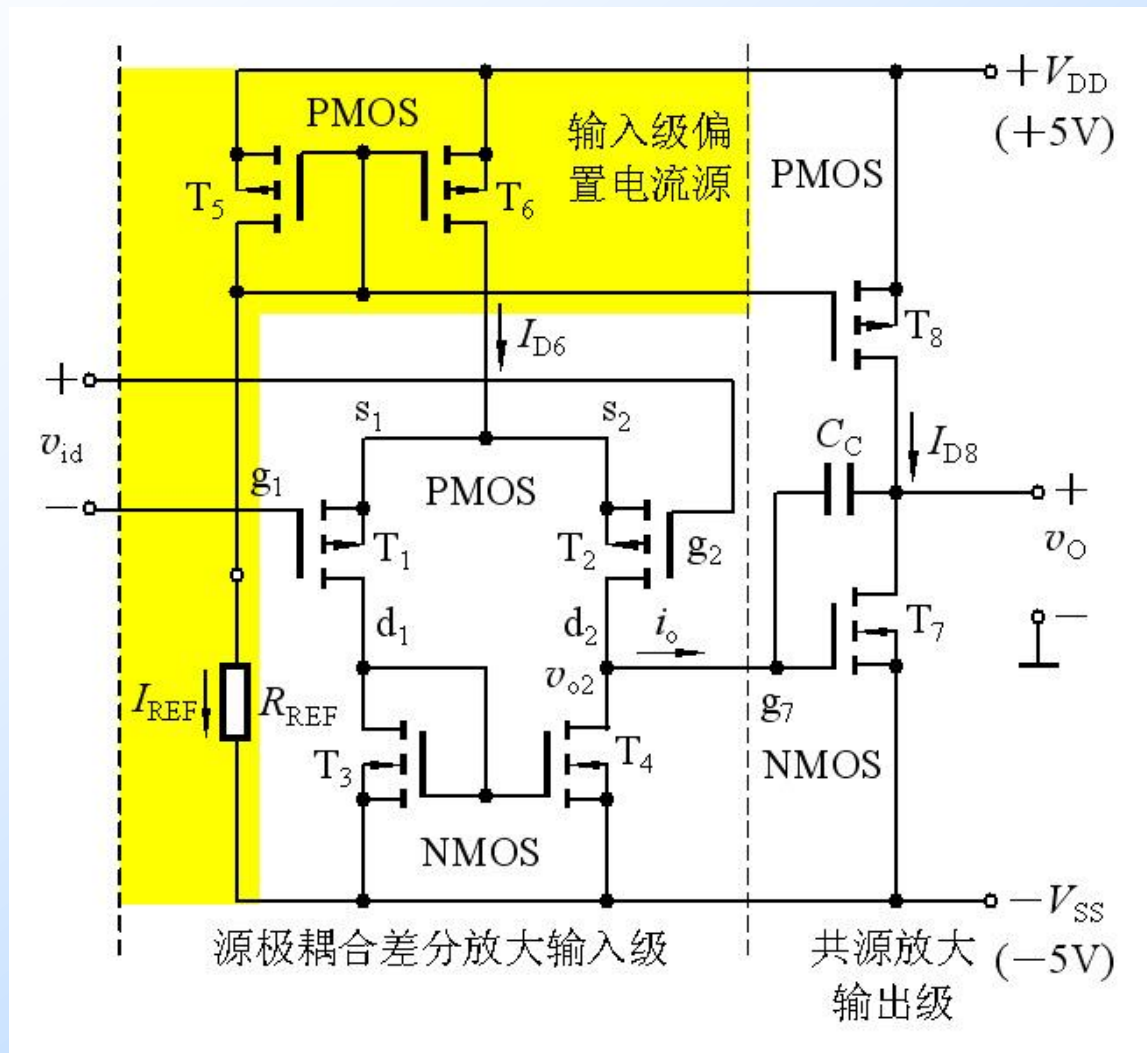
6.4 集成电路运算放大器

6.4.1 集成电路运算放大器CMOS MC14573

6.4.2 集成运算放大器741

6.4.1 CMOS MC14573 集成电路运算放大器

1. 电路结构和工作原理



2. 电路技术指标的分析计算

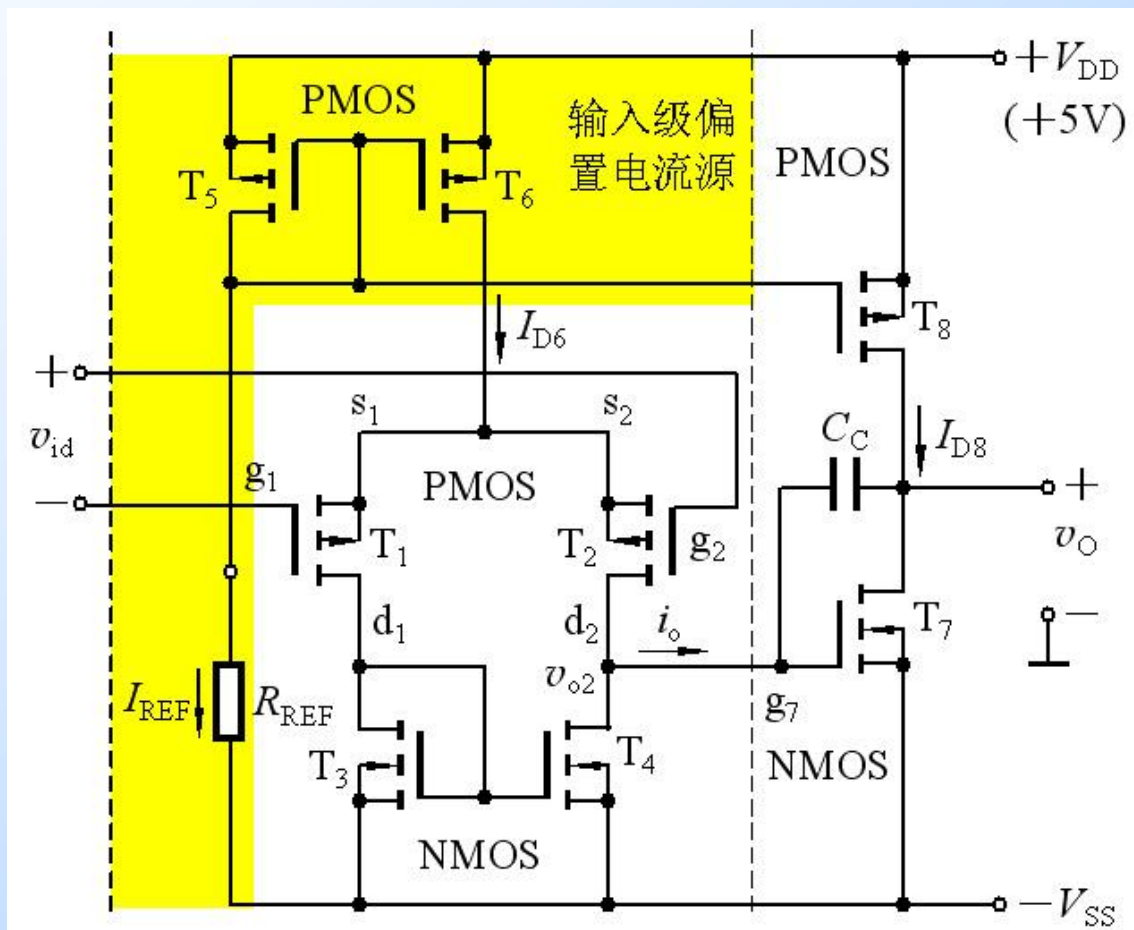
(1) 直流分析

$$\begin{aligned} I_{\text{REF}} &= I_0 \\ &= \frac{V_{\text{DD}} + V_{\text{SS}} - V_{\text{SG5}}}{R_{\text{REF}}} \\ &= \frac{V_{\text{DD}} + V_{\text{SS}} + V_{\text{GS5}}}{R_{\text{REF}}} \end{aligned}$$

$$I_{\text{REF}} = K_{\text{P5}} (V_{\text{GS5}} - V_{\text{T}})^2$$

已知 V_{T} 和 K_{P5} ，可求出 I_{REF}

根据各管子的宽长比，可求出其它支路电流。



2. 电路技术指标的分析计算

(2) 小信号分析

$$v_{gs1} = -\frac{v_{id}}{2} \quad v_{gs2} = +\frac{v_{id}}{2}$$

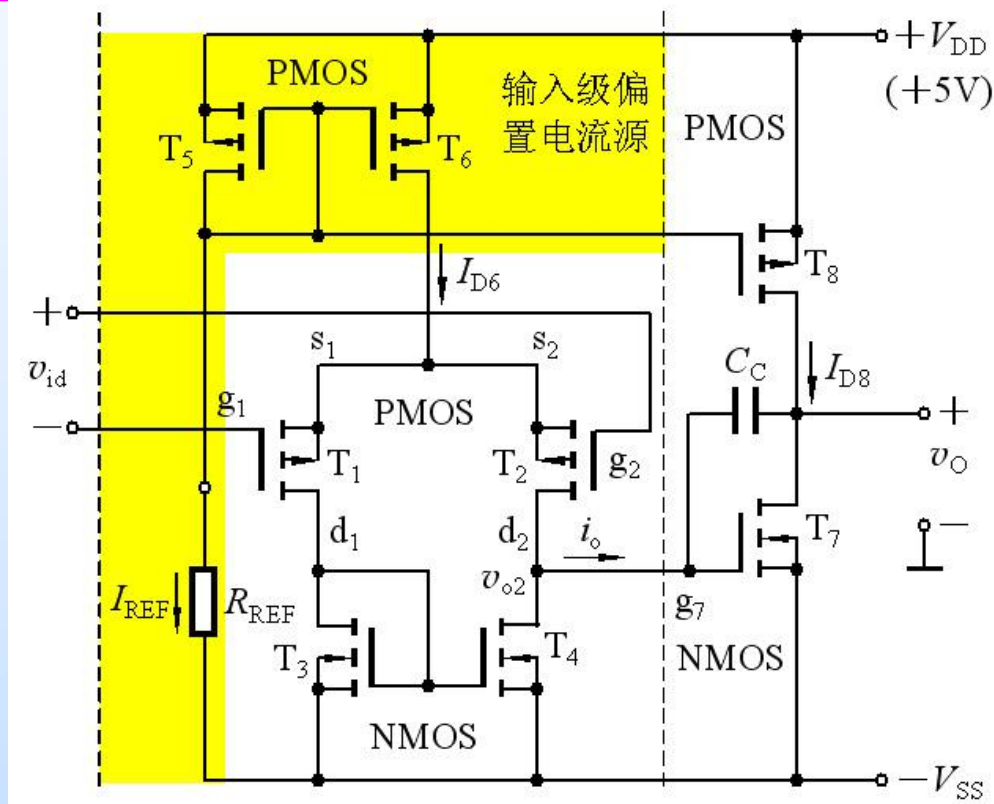
设 $g_{m1} = g_{m2} = g_m$

则

$$\begin{aligned} v_{o2} &= v_{gs7} = i_o (r_{o2} // r_{o4}) \\ &= (i_{d4} - i_{d2})(r_{o2} // r_{o4}) \\ &= (i_{d1} - i_{d2})(r_{o2} // r_{o4}) \end{aligned}$$

$$= \left[g_{m1} \left(-\frac{v_{id}}{2} \right) - g_{m2} \left(+\frac{v_{id}}{2} \right) \right] (r_{o2} // r_{o4})$$

$$= -g_m v_{id} (r_{ds2} // r_{ds4})$$



输入级电压增益

$$A_{v1} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = -g_m (r_{ds2} // r_{ds4})$$

2. 电路技术指标的分析计算

(2) 小信号分析

第二级电压增益

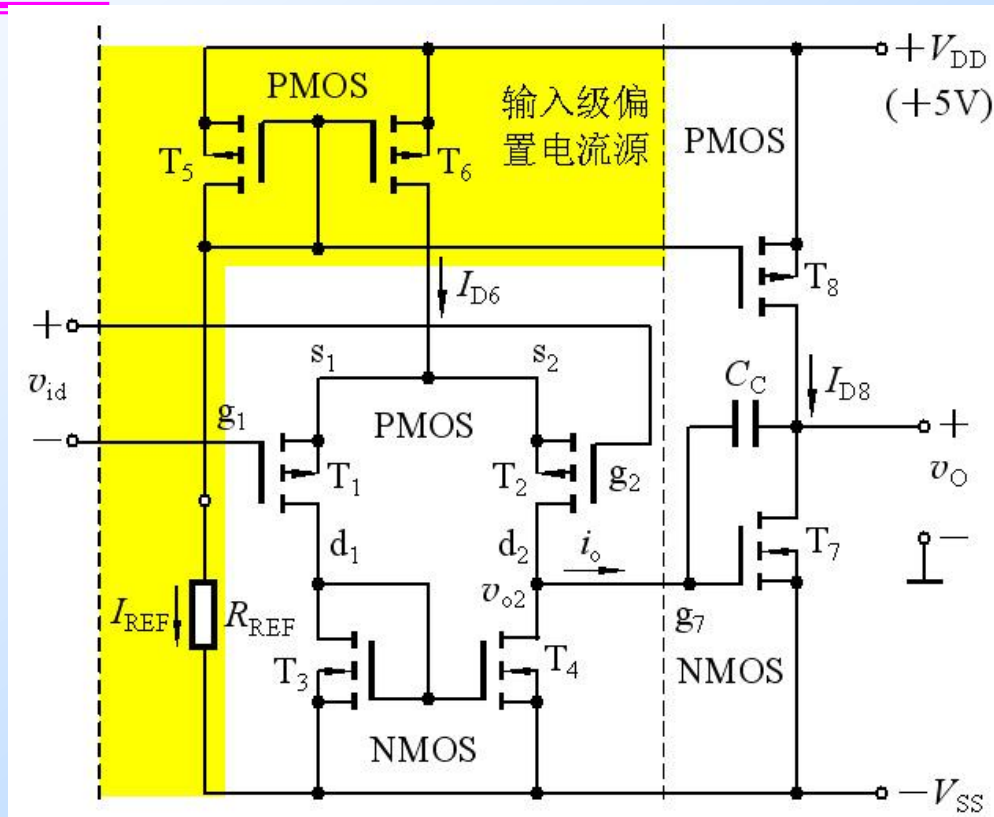
$$A_{v2} = v_o / v_{gs7} \\ = -g_{m7}(r_{ds7} // r_{ds8})$$

总电压增益

$$A_v = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

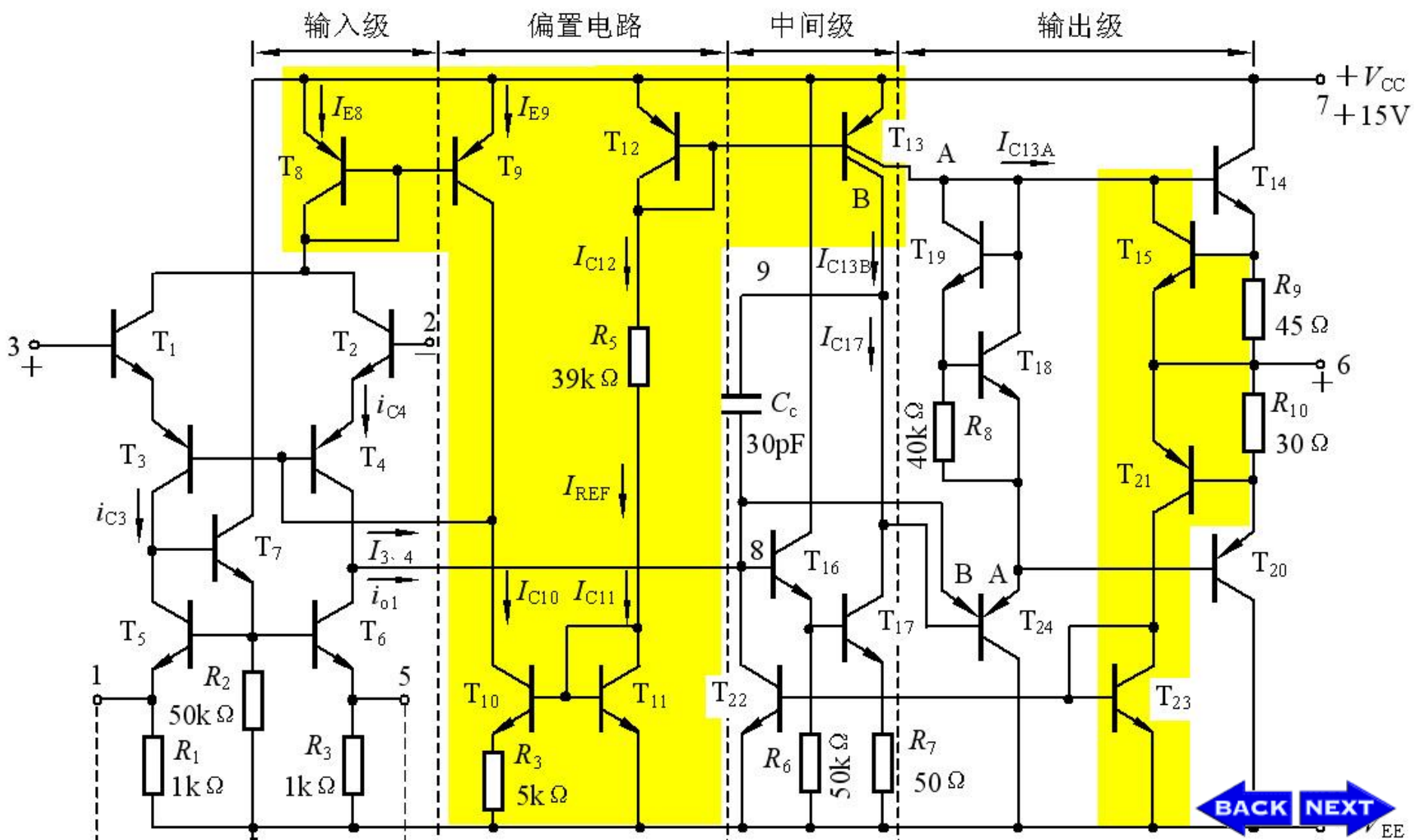
将参数代入计算得

$$A_v = 40884.8 \text{ (92.2 dB)}$$



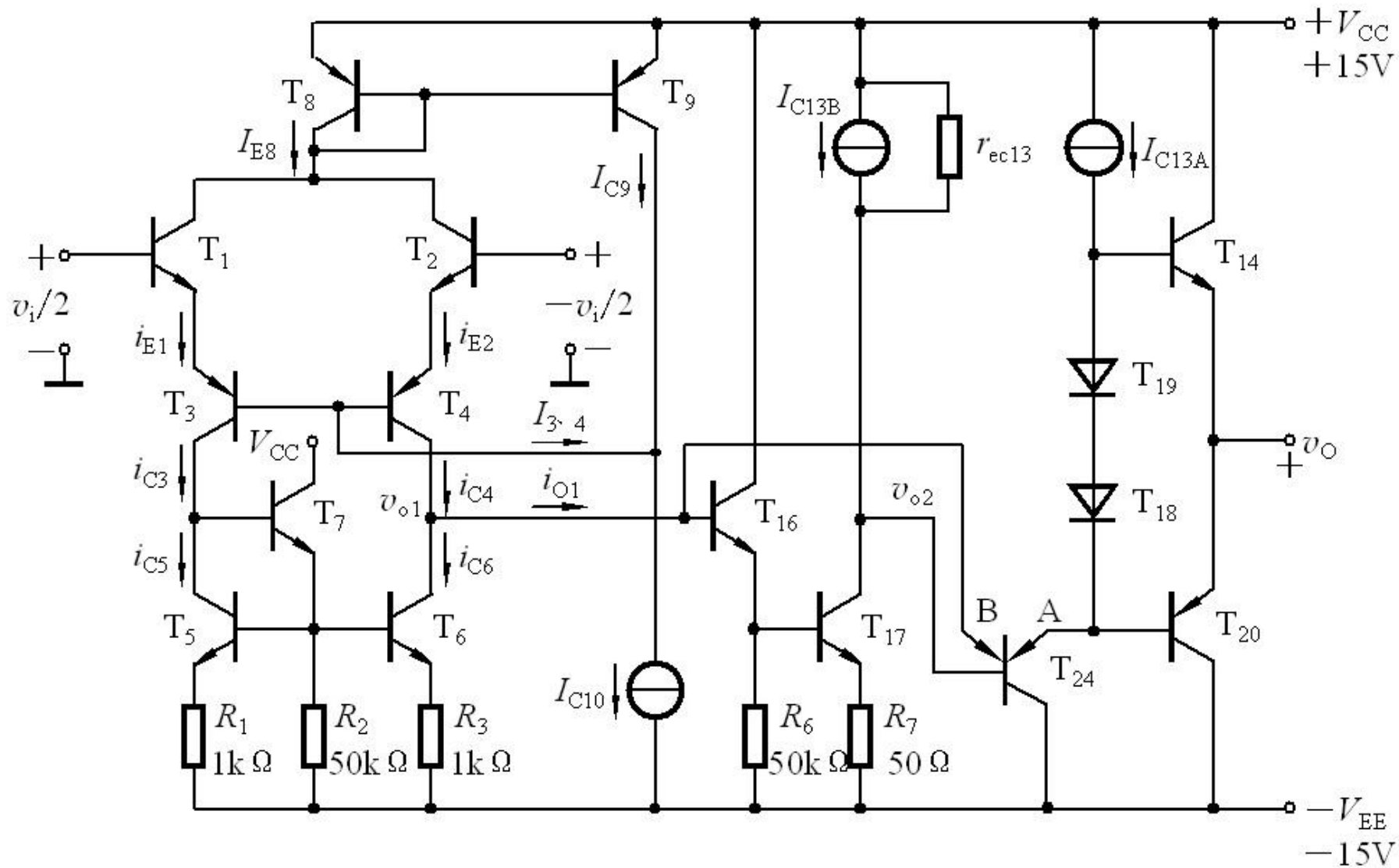
6.4.2 集成运算放大器741

原理电路



6.4.2 集成运算放大器741

简化电路





6.5 实际集成运算放大器的主要参数和对应用电路的影响

6.5.1 实际集成运放的主要参数

6.5.2 集成运放应用中的实际问题

6.5.1 实际集成运放的主要参数

输入直流误差特性（输入失调特性）

1. 输入失调电压 V_{IO}

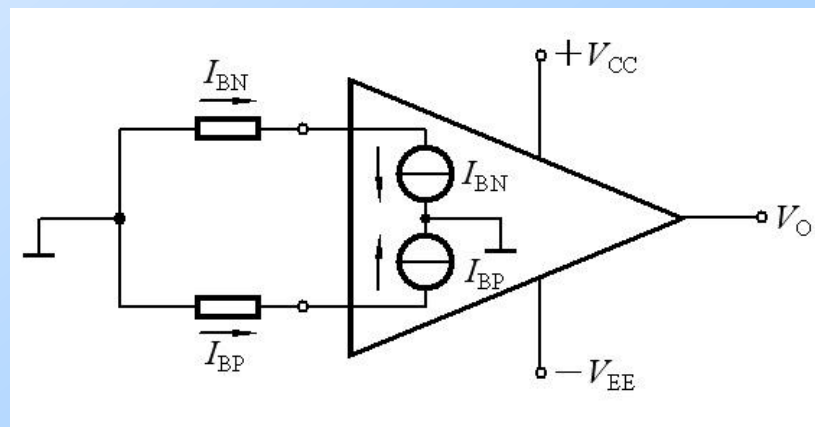
在室温（25℃）及标准电源电压下，输入电压为零时，为了使集成运放的输出电压为零，在输入端加的补偿电压叫做失调电压 V_{IO} 。一般约为 $\pm (1 \sim 10) \text{ mV}$ 。超低失调运放为 $(1 \sim 20) \mu\text{V}$ 。高精度运放OP-117 $V_{IO}=4\mu\text{V}$ 。MOSFET达20 mV。

2. 输入偏置电流 I_{IB}

输入偏置电流是指集成运放两个输入端静态电流的平均值

$$I_{IB} = (I_{BN} + I_{BP}) / 2$$

BJT为10 nA ~ 1μA；MOSFET运放 I_{IB} 在pA数量级。



6.5.1 实际集成运放的主要参数

输入直流误差特性（输入失调特性）

3. 输入失调电流 I_{IO}

输入失调电流 I_{IO} 是指当输入电压为零时流入放大器两输入端的静态基极电流之差，即 $I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}|$
一般约为 $1 \text{ nA} \sim 0.1 \mu\text{A}$ 。

4. 温度漂移

(1) 输入失调电压温漂 $\Delta V_{IO} / \Delta T$

(2) 输入失调电流温漂 $\Delta I_{IO} / \Delta T$

6.5.1 实际集成运放的主要参数

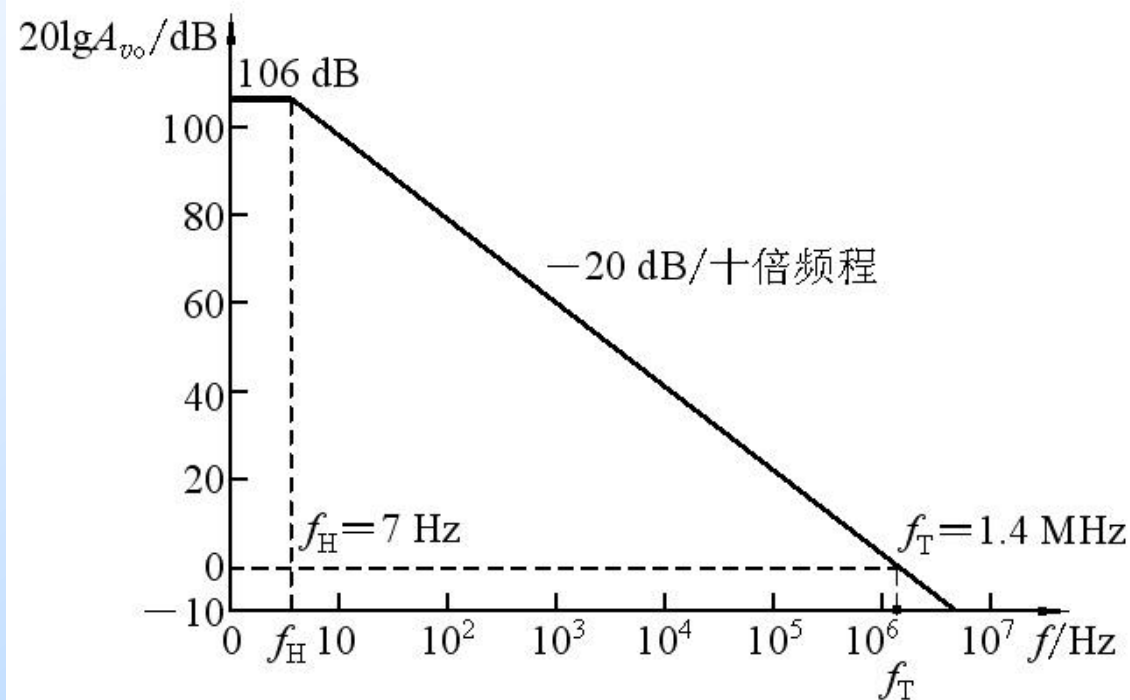
差模特性

1. 开环差模电压增益 A_{v0} 和带宽BW

开环差模电压增益 A_{v0}

开环带宽 $BW(f_H)$

单位增益带宽 $BW_G(f_T)$



741型运放 A_{v0} 的频率响应

6.5.1 实际集成运放的主要参数

差模特性

2. 差模输入电阻 r_{id} 和输出电阻 r_o

- ▶ BJT输入级的运放 r_{id} 一般在几百千欧到数兆欧
- ▶ MOSFET为输入级的运放 $r_{id} > 10^{12}\Omega$
- ▶ 超高输入电阻运放 $r_{id} > 10^{13}\Omega$ 、 $I_{IB} \leq 0.040\text{pA}$
- ▶ 一般运放的 $r_o < 200\Omega$ ，而超高速AD9610的 $r_o = 0.05\Omega$ 。

3. 最大差模输入电压 V_{idmax}

6.5.1 实际集成运放的主要参数

共模特性

1. 共模抑制比 K_{CMR} 和共模输入电阻 r_{ic}

一般通用型运放 K_{CMR} 为(80~120) dB, 高精度运放可达140dB, $r_{\text{ic}} \geq 100\text{M}\Omega$ 。

2. 最大共模输入电压 V_{icmax}

一般指运放在作电压跟随器时, 使输出电压产生1%跟随误差的共模输入电压幅值, 高质量的运放可达 $\pm 13\text{V}$ 。

6.5.1 实际集成运放的主要参数

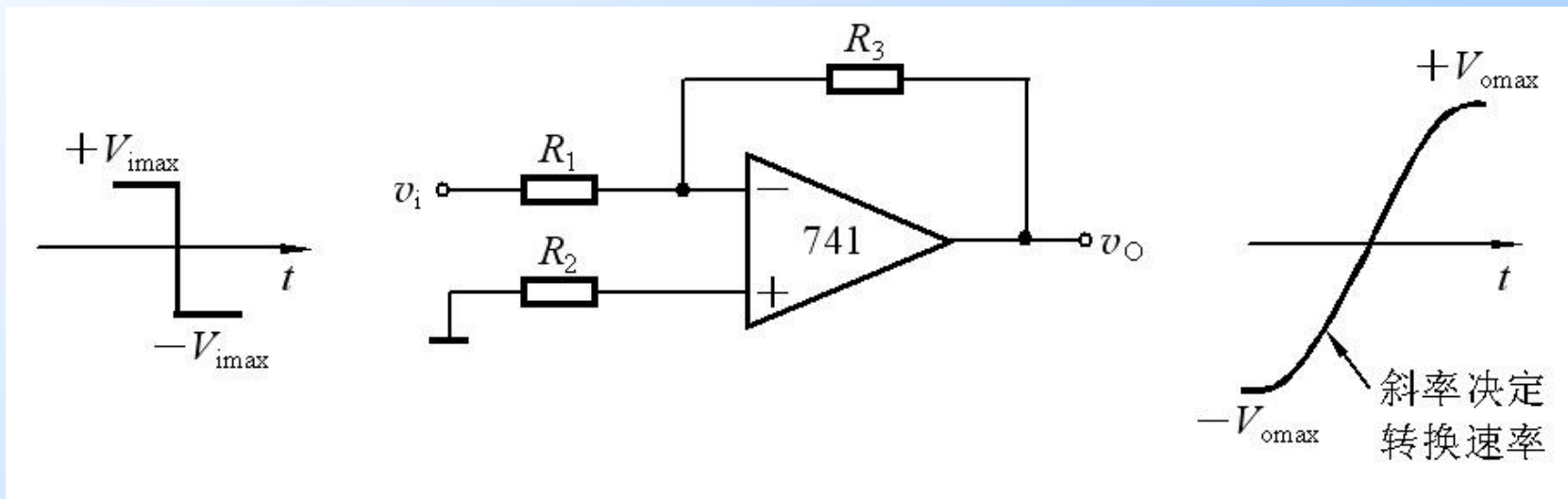
大信号动态特性

1. 转换速率 S_R

放大电路在闭环状态下，输入为大信号（例如阶跃信号）时，

输出电压对时间的最大变化速率，即
$$S_R = \left. \frac{dv_o(t)}{dt} \right|_{\max}$$

若信号为 $v_i = V_{im} \sin 2\pi f t$ ，则运放的 S_R 必须满足 $S_R \geq 2\pi f_{\max} V_{om}$



6.5.1 实际集成运放的主要参数

大信号动态特性

2. 全功率带宽 BW_P

指运放输出最大峰值电压时允许的最高频率，即

$$BW_P = f_{\max} = \frac{S_R}{2\pi V_{om}}$$

S_R 和 BW_P 是大信号和高频信号工作时的重要指标。一般通用型运放 S_R 在 $nV/\mu s$ 以下，741的 $S_R=0.5V/\mu s$ 而高速运放要求 $S_R > 30V/\mu s$ 以上。目前超高速的运放如AD9610的 $S_R > 3500V/\mu s$ 。



6.5.1 实际集成运放的主要参数

电源特性

1. 电源电压抑制比 K_{SVR}

衡量电源电压波动对输出电压的影响

2. 静态功耗 P_{V}



6.5.2 集成运放应用中的实际问题

1. 集成运放的选用

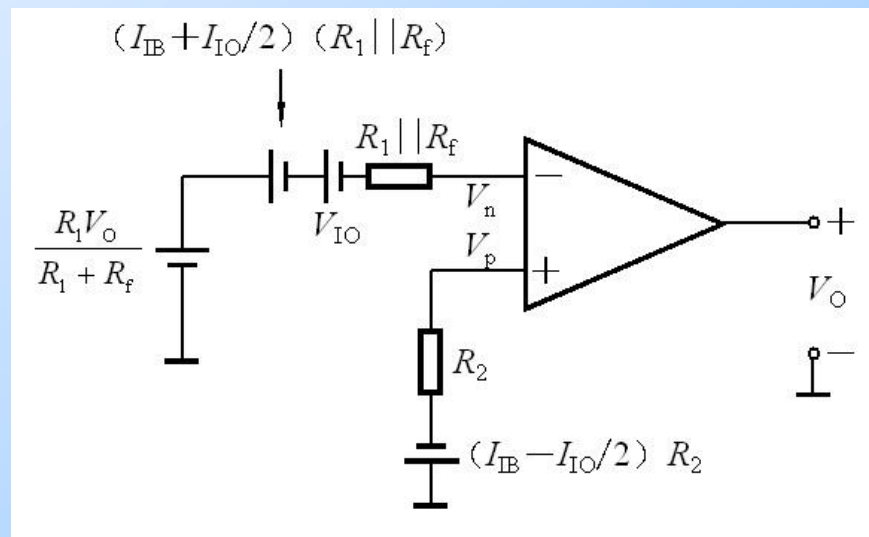
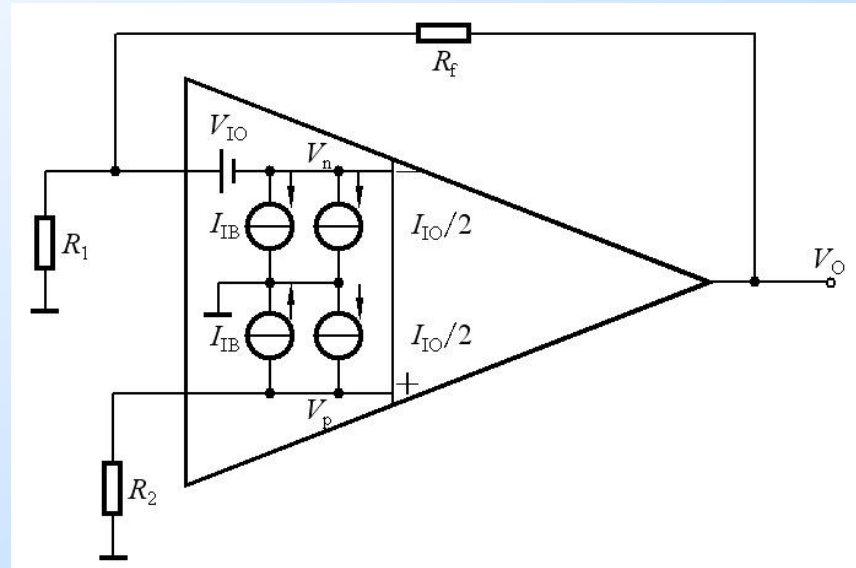
根据技术要求应首选通用型运放，当通用型运放难以满足要求时，才考虑专用型运放，这是因为通用型器件的各项参数比较均衡，做到技术性与经济性的统一。至于专用型运放，虽然某项技术参数很突出，但其他参数则难以兼顾，例如低噪声运放的带宽往往设计得较窄，而高速型与高精度常常有矛盾，如此等等。

6.5.2 集成运放应用中的实际问题

2. 失调电压 V_{IO} 、失调电流 I_{IO} 和偏置电流 I_{IB} 带来的误差

输入为零时的等效电路

$$\left\{ \begin{array}{l} V_P = -\left(I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}\right)R_2 \\ V_N = V_O \frac{R_1}{R_1 + R_f} \\ -\left(I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2}\right)(R_1 // R_f) \\ -V_{IO} \\ V_P \approx V_N \end{array} \right.$$





解得误差电压

$$V_O = (1 + R_f / R_1) \left[V_{IO} + I_{IB} (R_1 // R_f - R_2) + \frac{1}{2} I_{IO} (R_1 // R_f + R_2) \right]$$

当 $R_2 = R_1 // R_f$ 时，可以消除偏置电流 I_{IB} 引起的误差，此时

$$V_O = (1 + R_f / R_1) (V_{IO} + I_{IO} R_2)$$

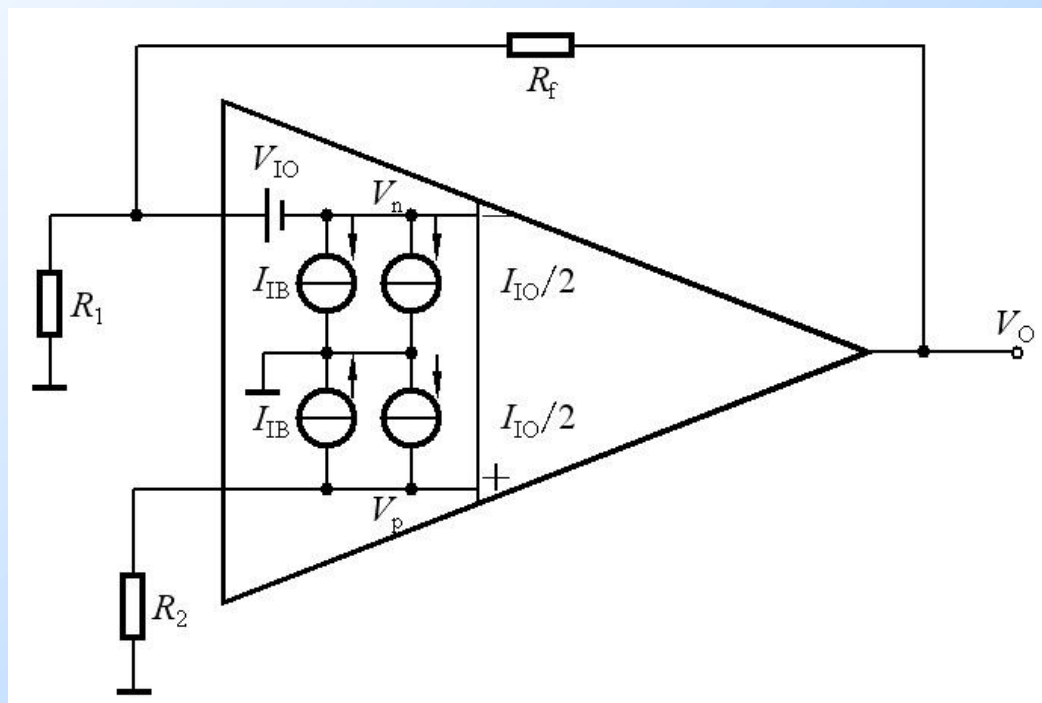
V_{IO} 和 I_{IO} 引起的误差仍存在

当电路为积分运算时，

即 R_f 换成电容 C ，则

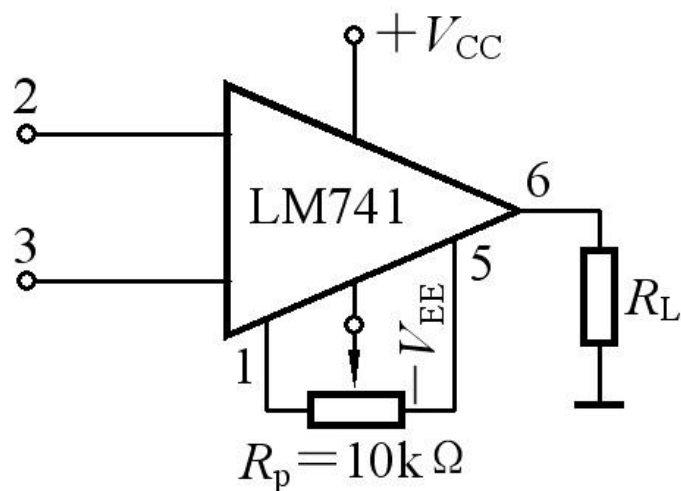
$$v_O(t) = [V_{IO}(t) + I_{IO}(t)R_2] + \frac{1}{R_1 C} \left[\int V_{IO}(t) dt + \int I_{IO}(t)R_2 dt \right]$$

时间越长，误差越大，且易使输出进入饱和状态。



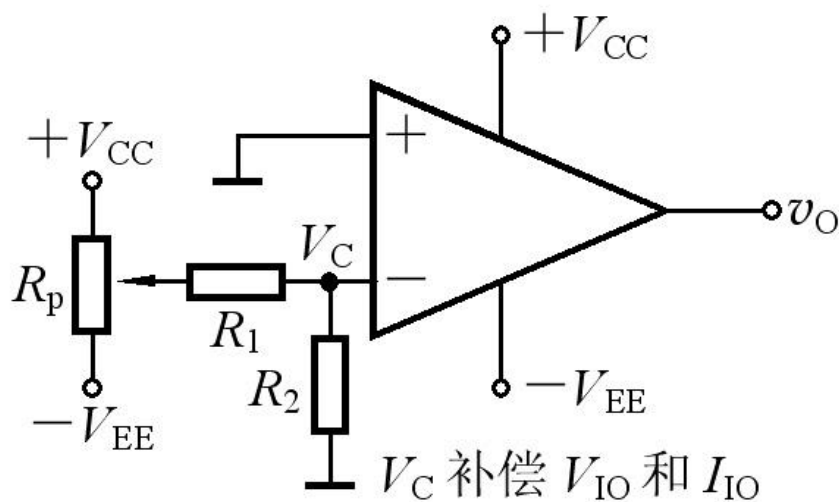
6.5.2 集成运放应用中的实际问题

3. 调零补偿



(a)

(a) 调零电路



(b)

(b) 反相端加入补偿电路