

7 模拟集成电路



7.1 模拟集成电路中的直流偏置技术

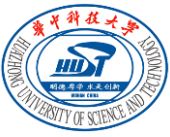
7.2 差分式放大电路

*7.3 带有源负载的差分式放大电路

7.4 集成运算放大器电路简介

7.5 运放主要参数和相关应用问题

7.1 直流电流源



7.1.1 FET电流源

7.1.2 BJT电流源

7.1.1 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源

T_1 、 T_2 的参数全同

只要满足 $V_{GS} > V_{TN}$

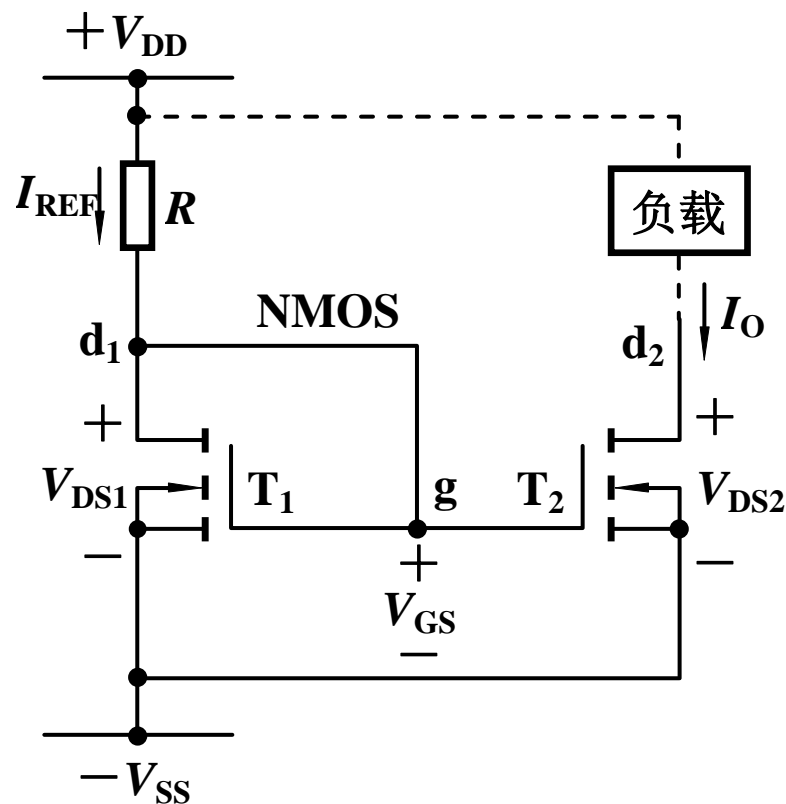
必有 $V_{DS1} > V_{GS} - V_{TN}$

T_1 一定工作在饱和区

又因为 $V_{GS2} = V_{GS1} = V_{GS}$

T_2 漏极接负载构成回路后，只要满足 $V_{DS2} > V_{GS} - V_{TN}$ ，就一定工作在饱和区，且有

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



1. MOSFET镜像电流源

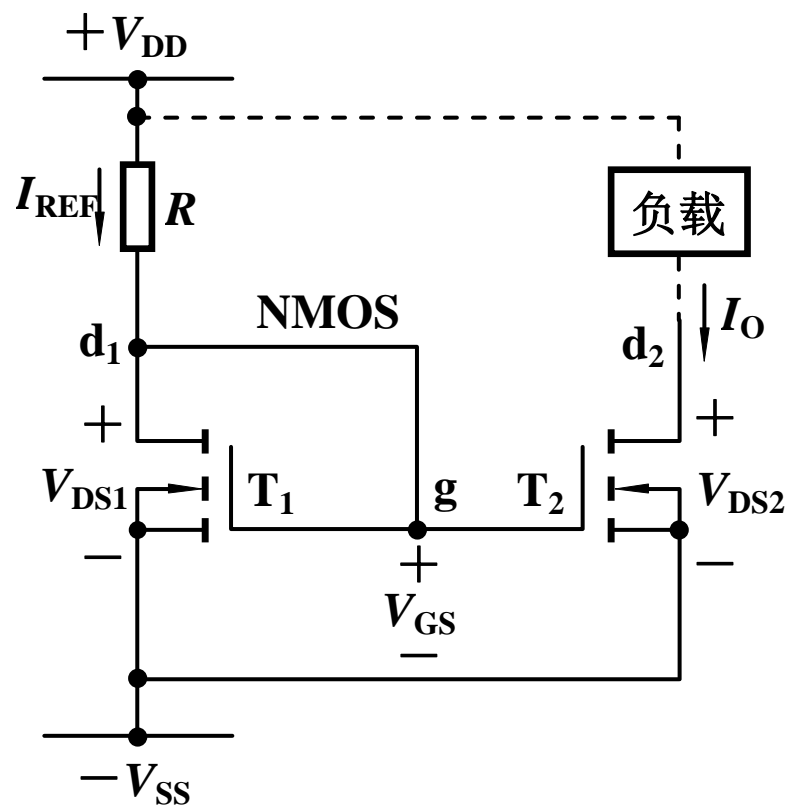
$$I_{\text{O}} = I_{\text{D2}} = I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{DD}} + V_{\text{SS}} - V_{\text{GS}}}{R}$$

再根据 $I_{\text{REF}} = I_{\text{D1}} = K_n (V_{\text{GS}} - V_{\text{TN}})^2$

便可求出 I_0 的电流值。

I_O 的电流值与负载无关。

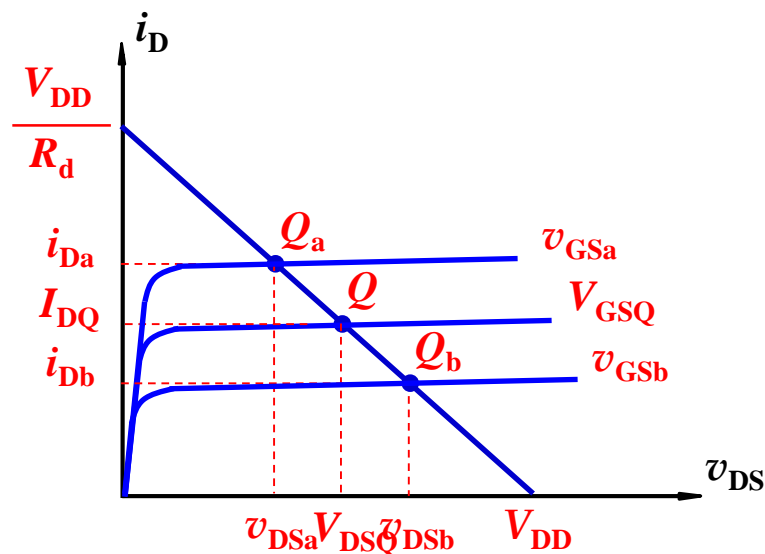
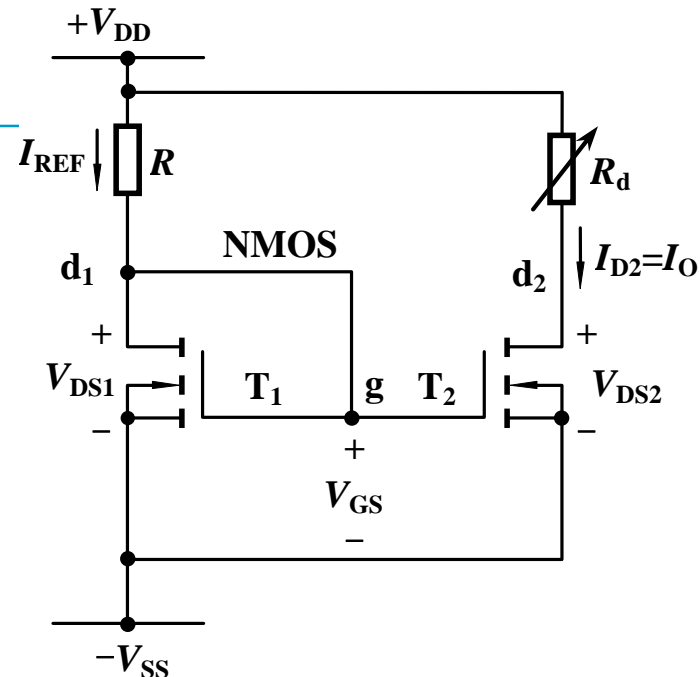
负载在一定范围内变化时
(保证 $V_{DS2} > V_{GS} - V_{TN}$)， I_O 的电
流值将保持不变，反映出 I_O 的恒
流特性。



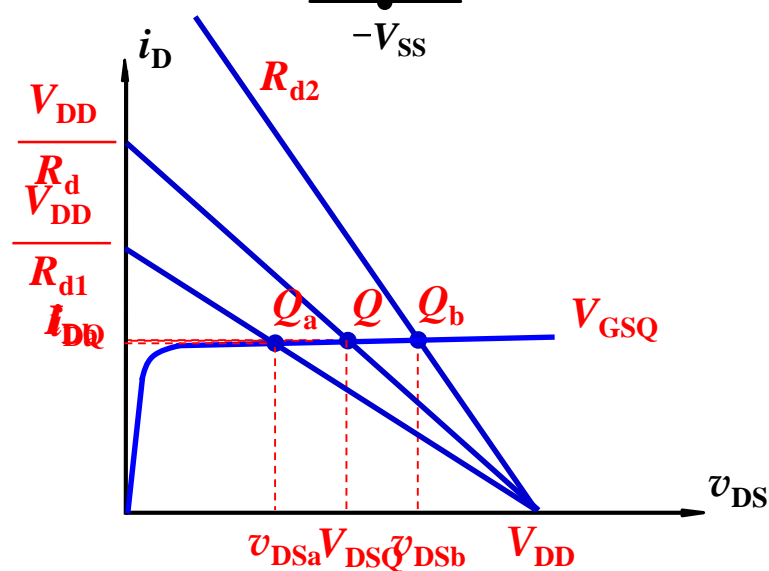
7.1.1 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源

MOS管分别处于放大和恒流状态时的图解



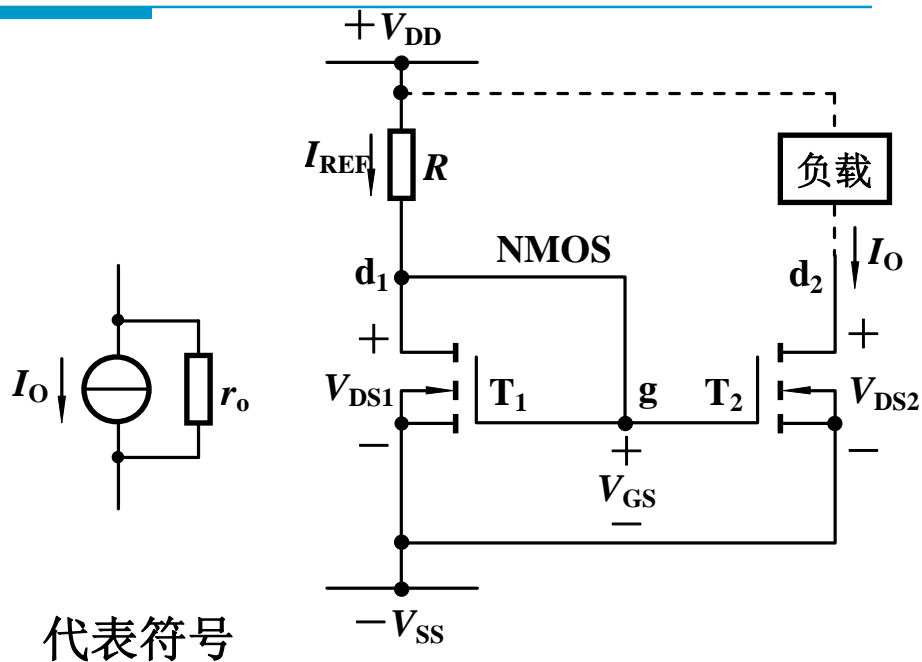
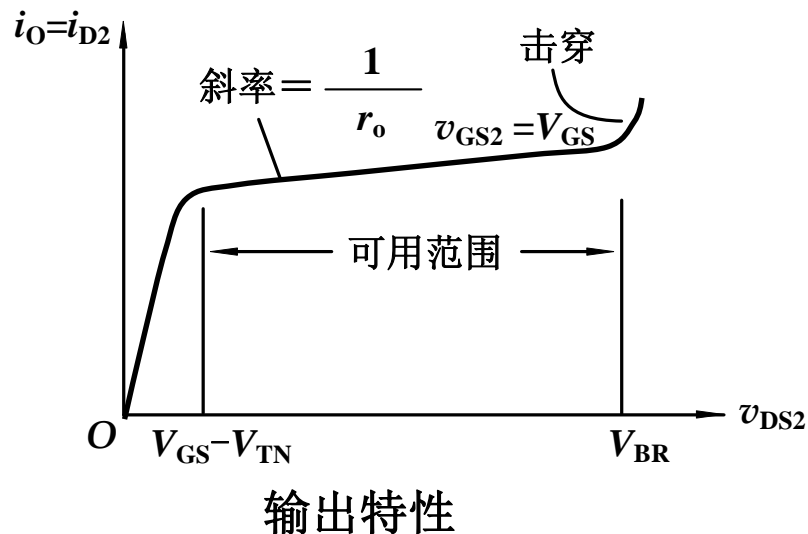
放大时



恒流时

7.1.1 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源



动态电阻(交流电阻)

当器件具有不同的宽长比时

$$r_o = r_{ds2} = \left. \frac{\partial v_{DS2}}{\partial i_{D2}} \right|_{V_{GS2}=V_{GS}} \approx \frac{1}{\lambda I_{D2}}$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \quad (\lambda=0)$$

电流源是双口网络还是单口网络？

7.1.1 FET电流源

1. MOSFET镜像电流源

若用 T_3 代替 R ，且 $T_1 \sim T_3$ 特性相同

由于 $I_{D1} = I_{D3} = I_{REF} = K_n (V_{GS} - V_{TN})^2$

所以 $V_{GS3} = V_{GS} = \frac{1}{2}(V_{DD} + V_{SS})$

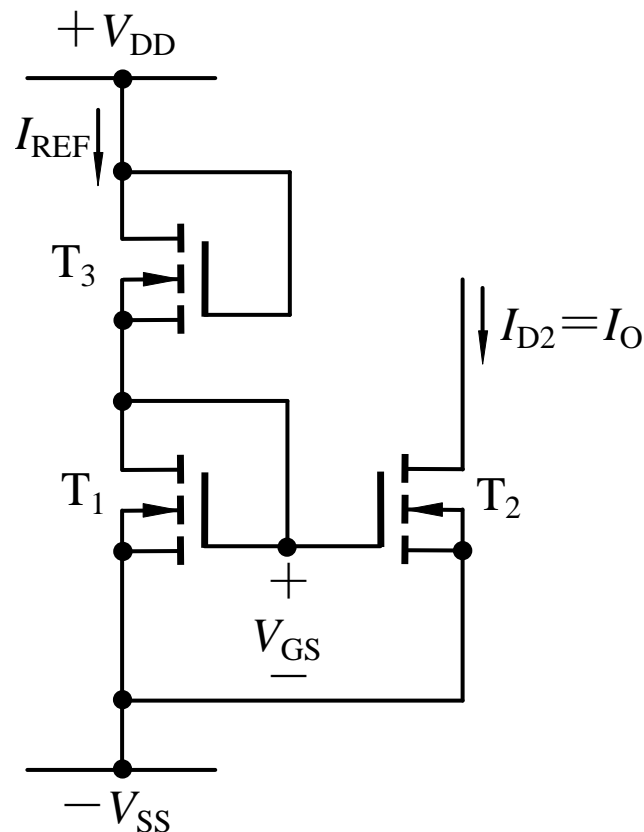
只要满足 $V_{DD} + V_{SS} > 2V_{TN}$

$T_1 \sim T_3$ 便可工作在饱和区

输出电流为

$$I_O = I_{D2} = K_n (V_{GS} - V_{TN})^2$$

若 T_2 仅在宽长比上与 T_1 和 T_3 不同，则 $I_O = I_{D2} = \frac{K'_n}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_{TN})^2$



7.1.1 FET电流源

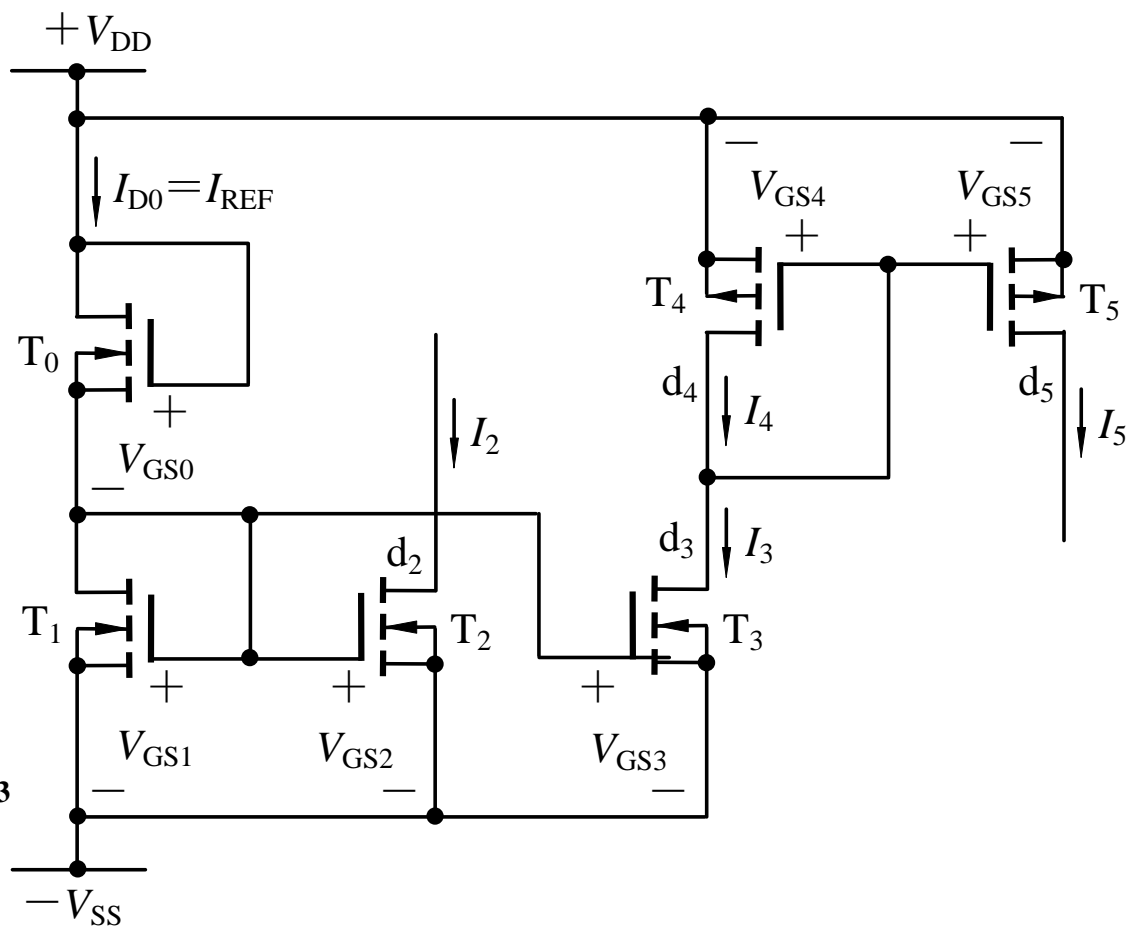
2. 多路电流源电路

除宽长比外， $T_0 \sim T_3$ 特性相同， T_4 、 T_5 特性相同

$$I_2 = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{REF}$$

$$I_3 = \frac{(W/L)_3}{(W/L)_1} I_{REF}$$

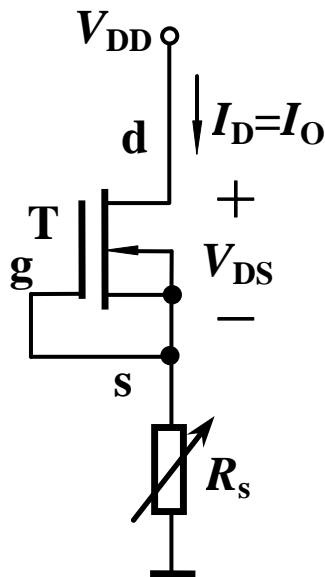
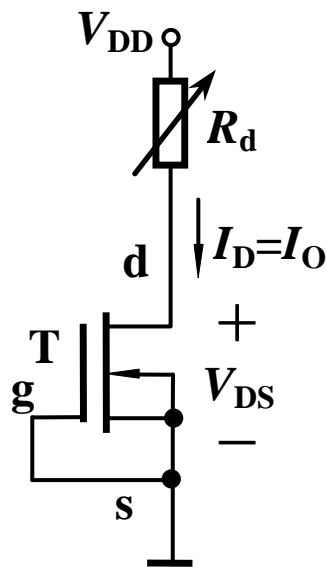
$$\begin{aligned} I_5 &= \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_4 = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_3 \\ &= \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} \frac{(W/L)_3}{(W/L)_1} I_{REF} \end{aligned}$$



需保证所有管子工作在饱和区

7.1.1 FET电流源

是电流源吗？



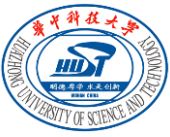
电流源内阻

$$r_o = r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_D}$$

需保证 $V_{DS} > V_{GS} - V_{PN} = -V_{PN}$

注意：N沟道耗尽型管的夹断电压 $V_{PN} < 0$

7.1 直流电流源



7.1.1 FET电流源

7.1.2 BJT电流源

7.1.2 BJT电流源

1. 镜像电流源

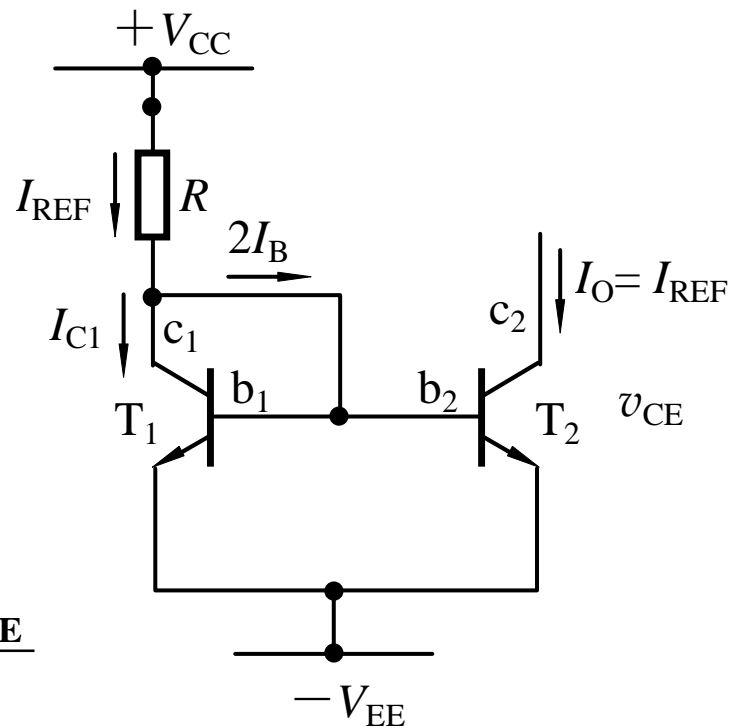
T_1 、 T_2 的参数全同

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

$$I_O = I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF}$$

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

I_O 在一定范围内与负载无关。



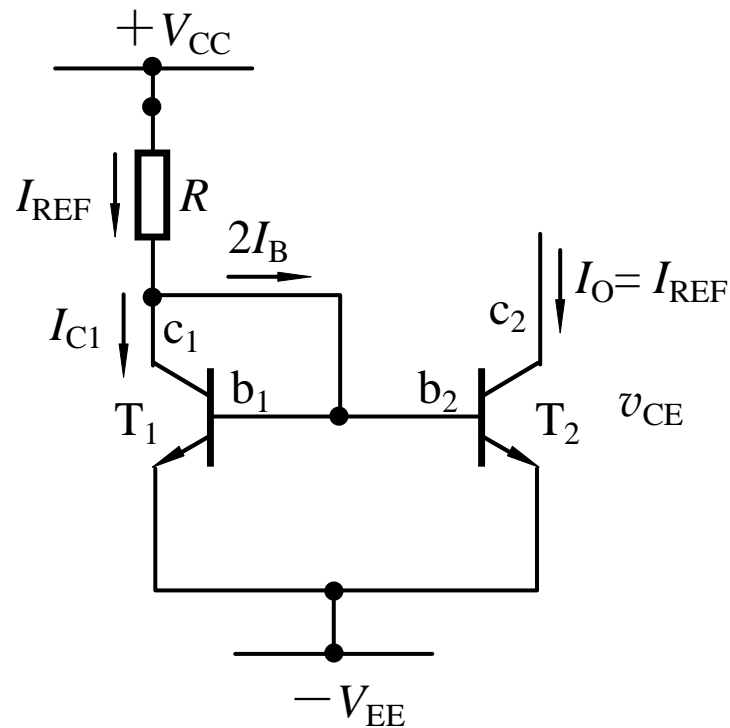
7.1.2 BJT电流源

1. 镜像电流源

动态电阻

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

一般 r_o 在几百千欧以上



7.1.2 BJT电流源

2. 微电流源

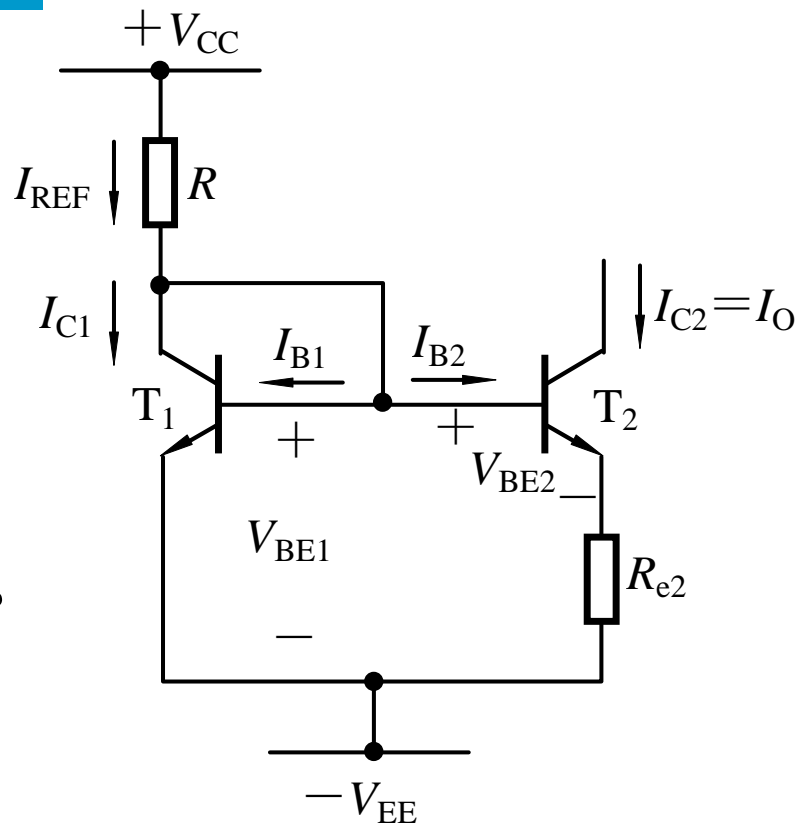
$$I_O = I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}}$$

$$= \frac{\Delta V_{BE}}{R_{e2}}$$

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)



7.1.2 BJT电流源

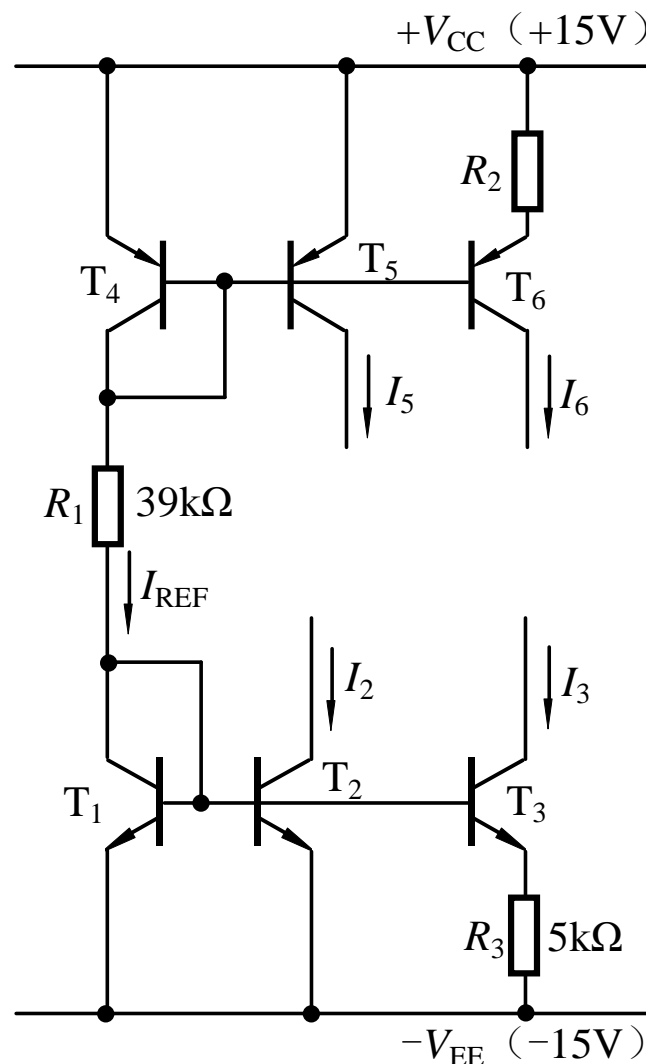
3. 多路电流源

T_1 、 R_1 和 T_4 支路产生基准电流 I_{REF}

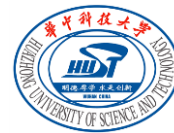
T_1 和 T_2 、 T_4 和 T_5 构成镜像电流源

T_1 和 T_3 、 T_4 和 T_6 构成了微电流源

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



7 模拟集成电路



7.1 模拟集成电路中的直流偏置技术

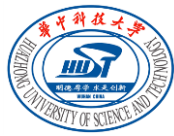
7.2 差分式放大电路

*7.3 带有源负载的差分式放大电路

7.4 集成运算放大器电路简介

7.5 运放主要参数和相关应用问题

7.2 差分式放大电路



7.2.1 MOSFET差分式放大电路

7.2.2 BJT差分式放大电路

7.2.3 差分式放大电路的传输特性

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

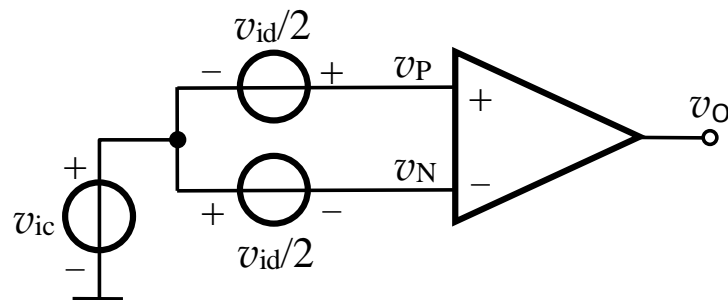
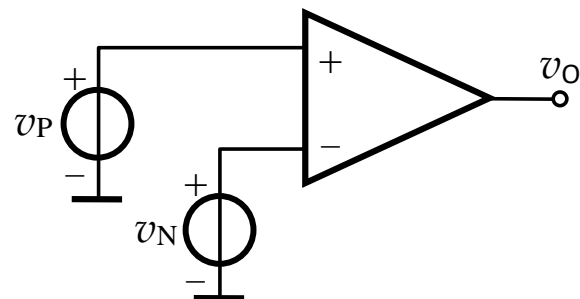
回顾

要能够放大直流!

差模输入信号 $v_{id} = v_P - v_N$

共模输入信号 $v_{ic} = \frac{v_P + v_N}{2}$

则有 $v_P = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$ $v_N = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$

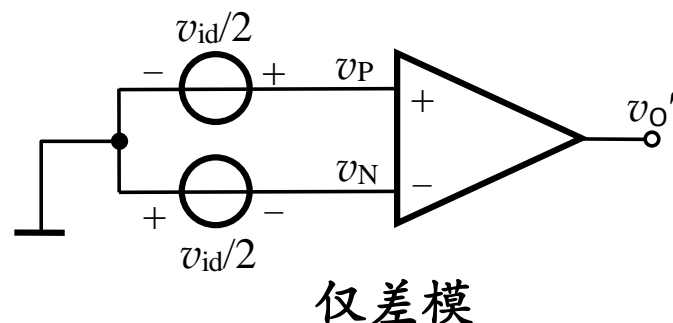
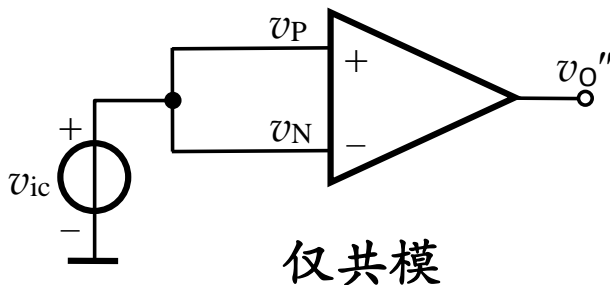


理想运放

$$A_{vd} = \infty$$

$$A_{vc} = 0$$

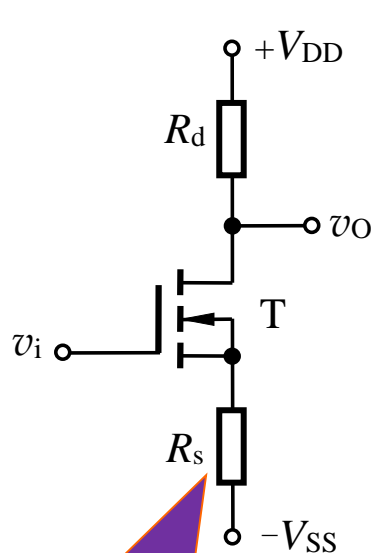
$$K_{CMR} = \infty$$



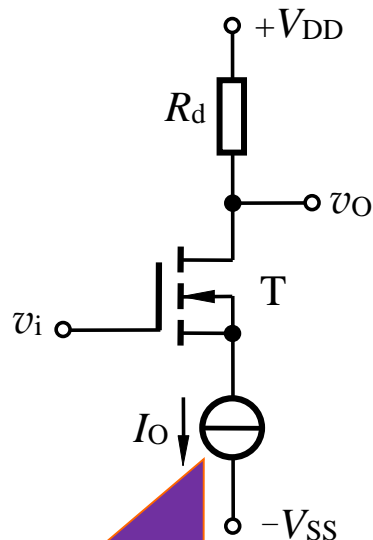
7.2.1 MOSFET差分式放大电路

电路组成 —— 直接耦合

共源放大电路

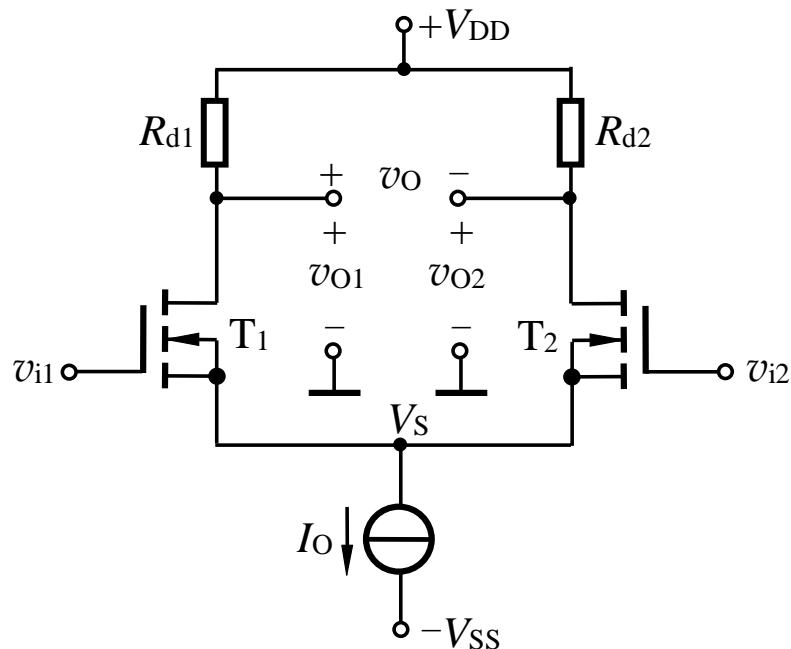


方便调整Q点
有稳定Q点作用



温度稳定性很好的
电流源
其动态电阻为 r_o

差分式放大电路



但增益太小

$$A_v = - \frac{g_m R_d}{1 + g_m r_o}$$

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

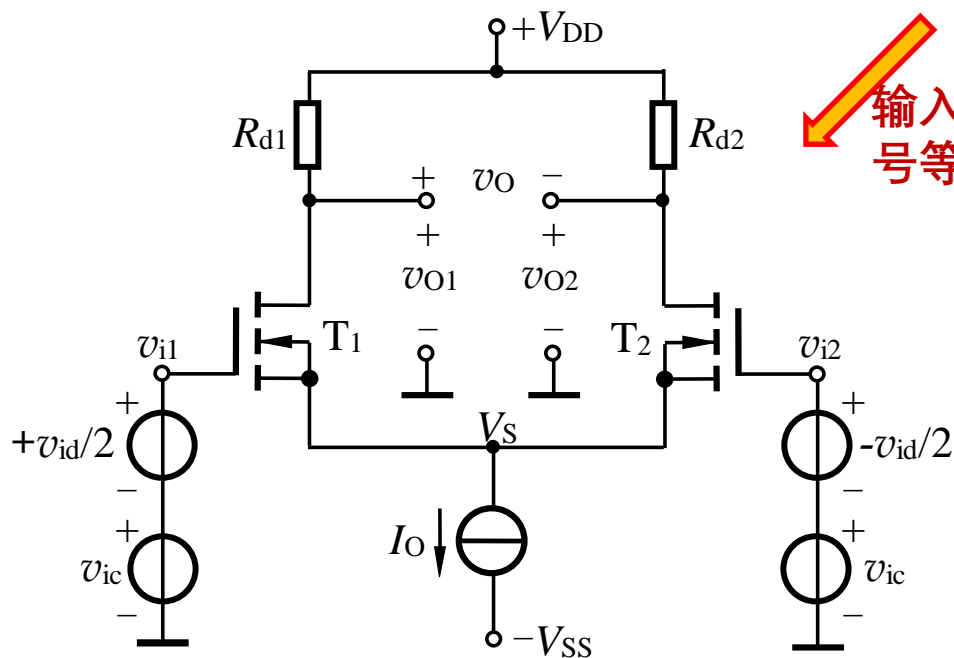
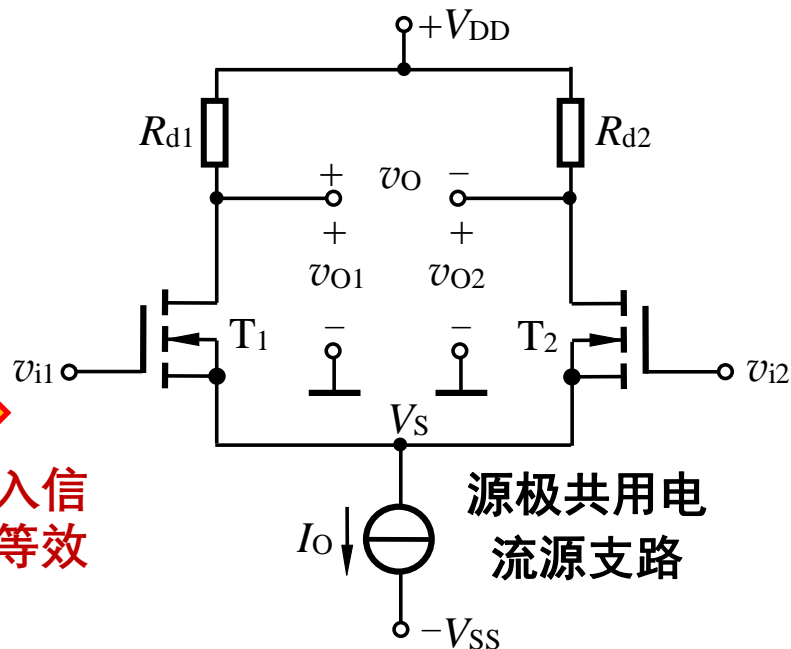
电路组成

两个输入端： v_{i1} 和 v_{i2}

两个输出端： v_{o1} 和 v_{o2}

工作方式：双入双出、双入单出、
单入双出、单入单出

源极耦合差分式放大电路



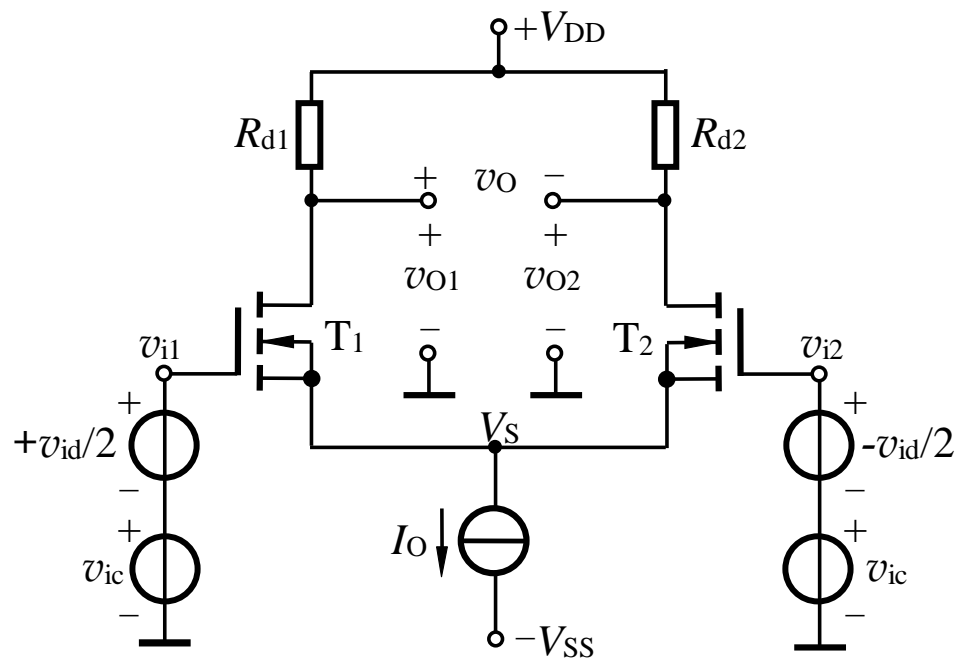
$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$$

$$v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2} \quad v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

电路组成

- 两输入端中的共模信号大小相等，相位相同；
- 两输入端中的差模信号大小相等，相位相反。



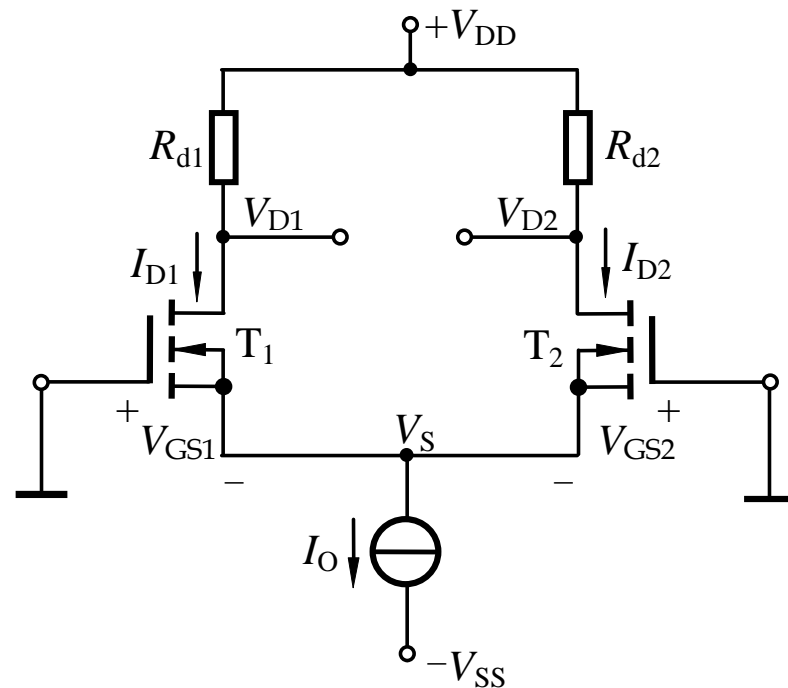
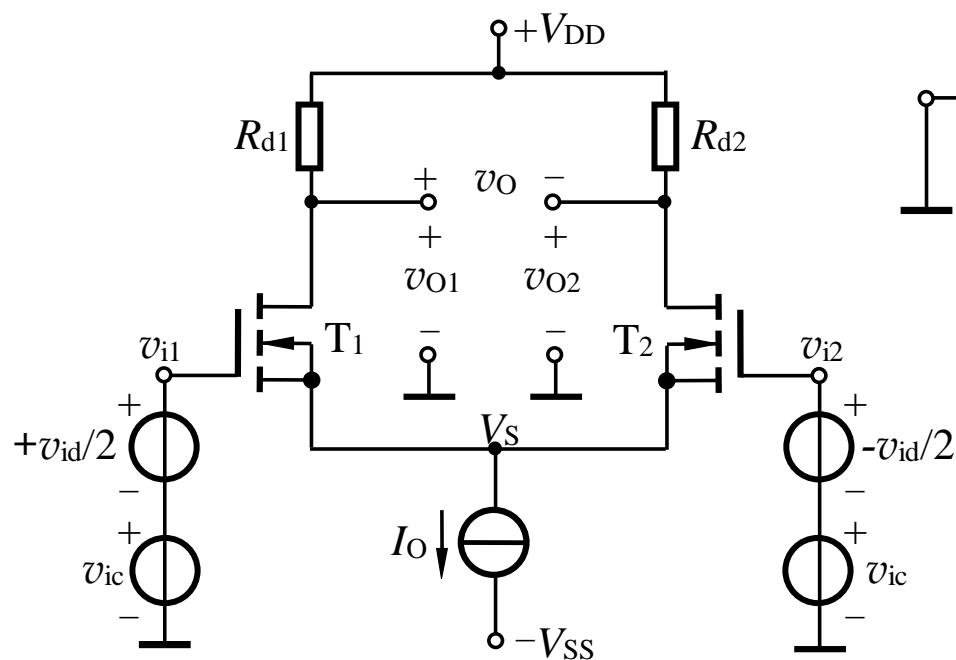
$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$$

$$v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2} \quad v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

静态分析

直流通路



7.2.1 MOSFET差分式放大电路

静态分析

$$I_{D1Q} = I_{D2Q} = I_{DQ} = \frac{1}{2} I_O$$

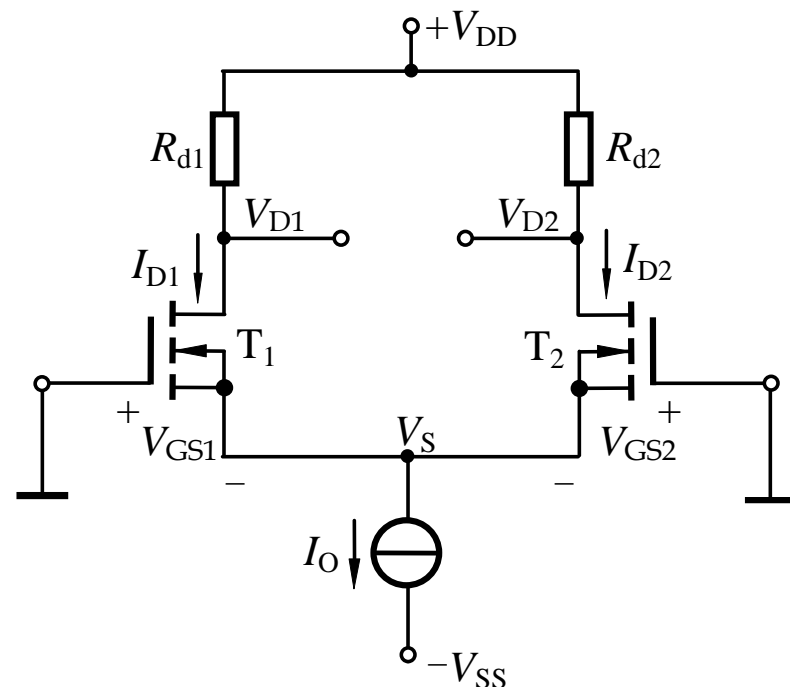
再由 $I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2$

可求得 V_{GSQ}

$$\begin{aligned} V_{DS1Q} &= V_{DS2Q} = V_{D1Q} - V_{SQ} \\ &= V_{DD} - I_{DQ} R_d - (-V_{GSQ}) \end{aligned}$$

最后需要校验是否工作在饱和区

静态时有 $v_O = V_{D1Q} - V_{D2Q} = 0$



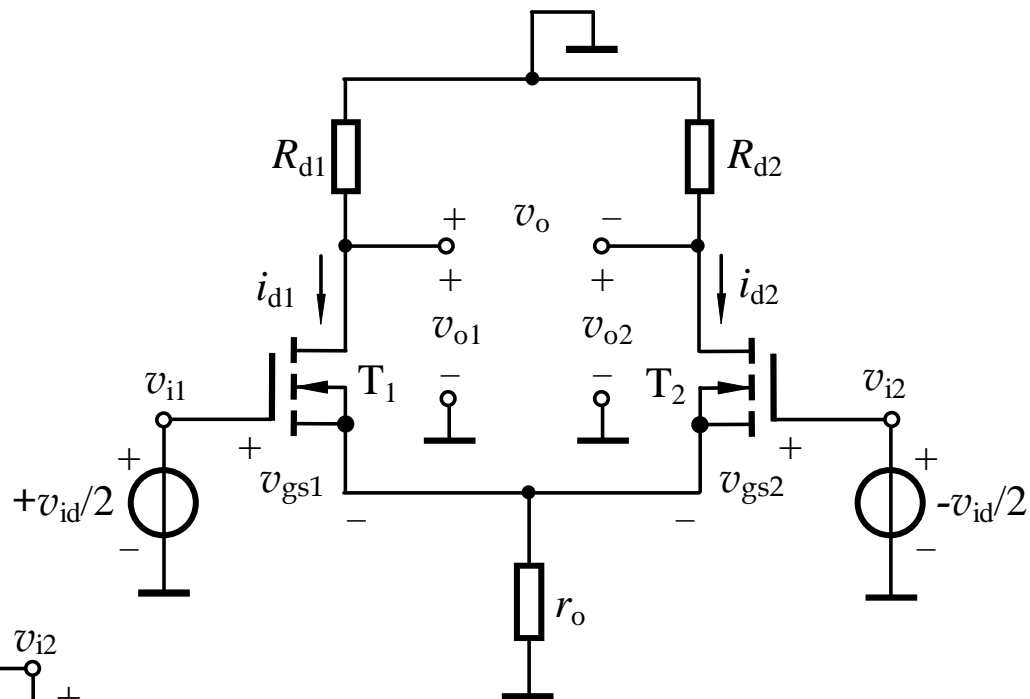
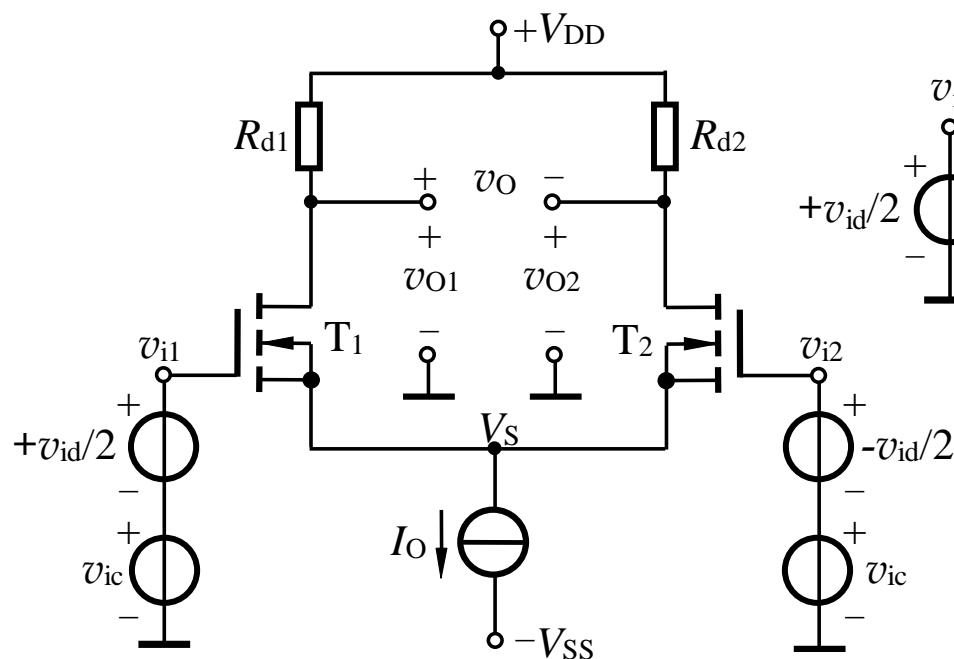
$$(V_{GS1Q} = V_{GS2Q} = V_{GSQ})$$

$$(R_{d1} = R_{d2} = R_d)$$

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时



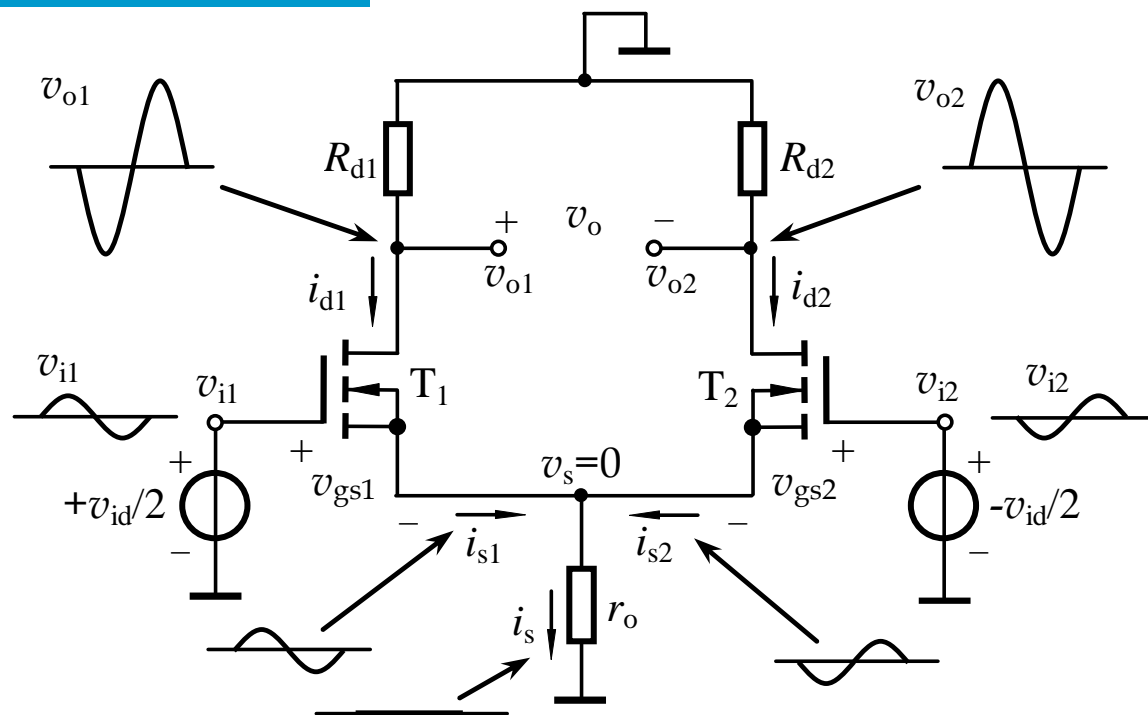
交流通路

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时

v_{i1} 和 v_{i2} 大小相等，相位相反。
 i_{s1} 的增加量等于 i_{s2} 的减小量， r_o 中无交流电流流过， $v_s = 0$ ，意味着源极相当于对地短路。



交流通路及差模信号作用情况

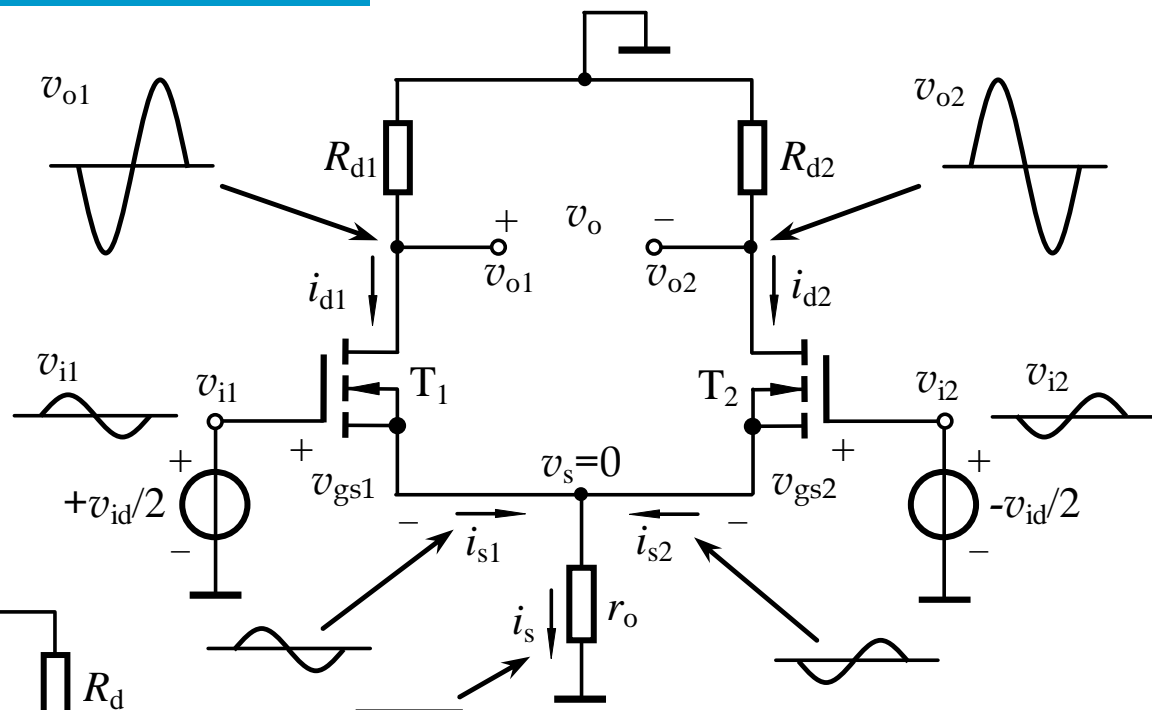
$$v_{o1} = -v_{o2}$$

表明在差模信号作用下，源极公共支路相当于短路。

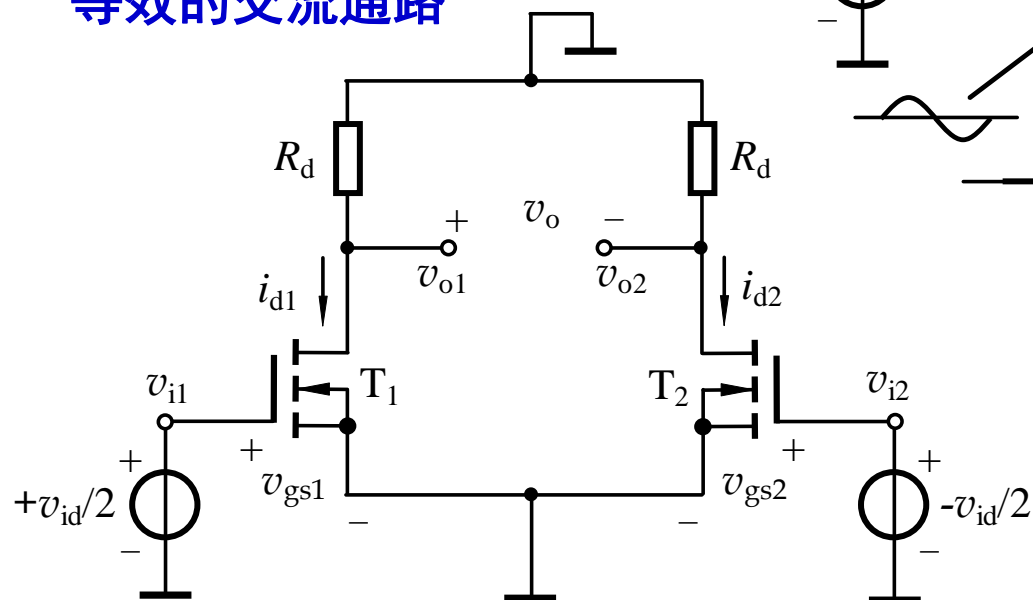
7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时



等效的交流通路



7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时

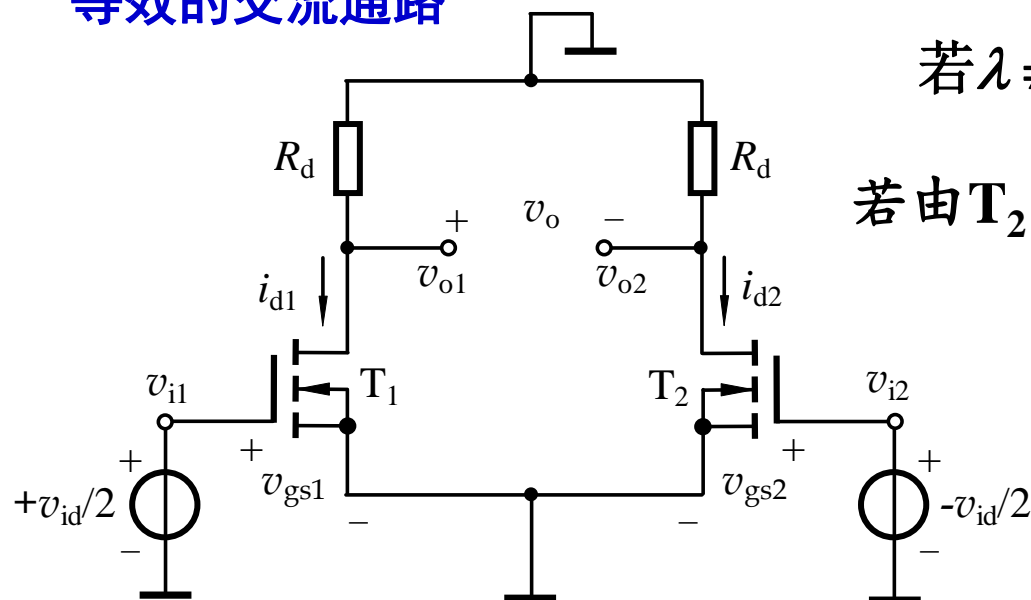
① 单端输出时的差模电压增益

单边就是标准的共源电路，但输入信号是 v_{id} 。

单端输出差模电压增益 (T_1 漏极输出)

$$A_{vd1} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} = \frac{v_{o1}}{2v_{i1}} = \frac{1}{2} A_{v1} = -\frac{1}{2} g_m R_{d1}$$

等效的交流通路



若 $\lambda \neq 0$, $A_{vd1} = -\frac{1}{2} g_m (r_{ds} // R_d)$

若由 T_2 漏极输出，则

$$A_{vd2} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{1}{2} g_m R_{d2}$$

只是相位相反(电路对称)

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时

① 单端输出时的差模电压增益

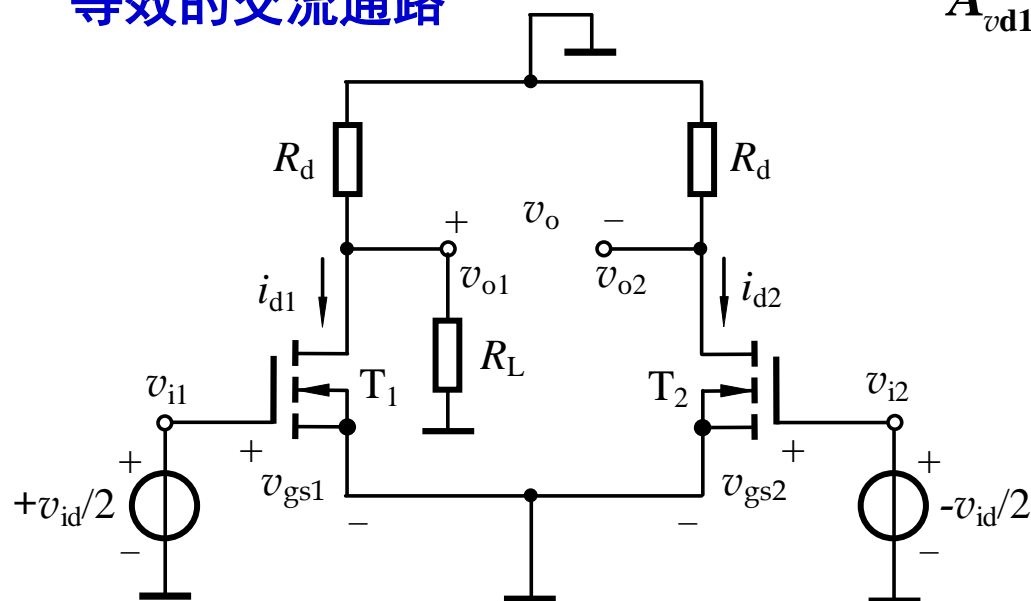
带 R_L 时

$$A_{vd1} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} = -\frac{1}{2} g_m (R_d // R_L)$$

若 $\lambda \neq 0$

$$A_{vd1} = -\frac{1}{2} g_m (r_{ds} // R_d // R_L)$$

等效的交流通路



7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时

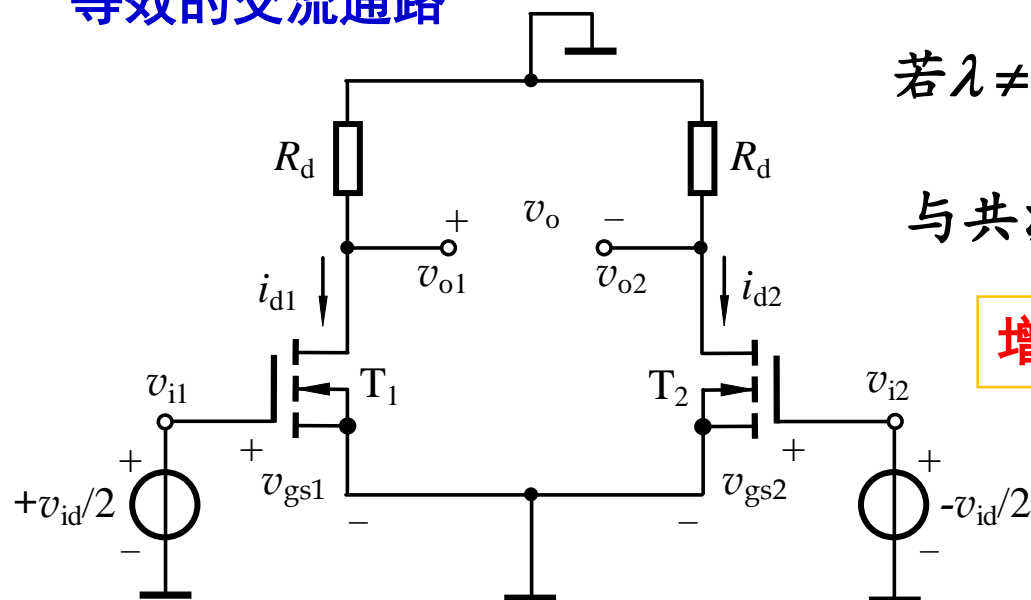
② 双端输出时的差模电压增益

因 $v_{i1} = -v_{i2}$, 故 $v_{o1} = -v_{o2}$

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

$$= \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = -g_m R_d$$

等效的交流通路



若 $\lambda \neq 0$, $A_{vd} = -g_m (r_{ds} // R_d)$

与共源放大电路的电压增益相同

增加的元器件贡献在哪里？

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入差模信号时

带 R_L 时

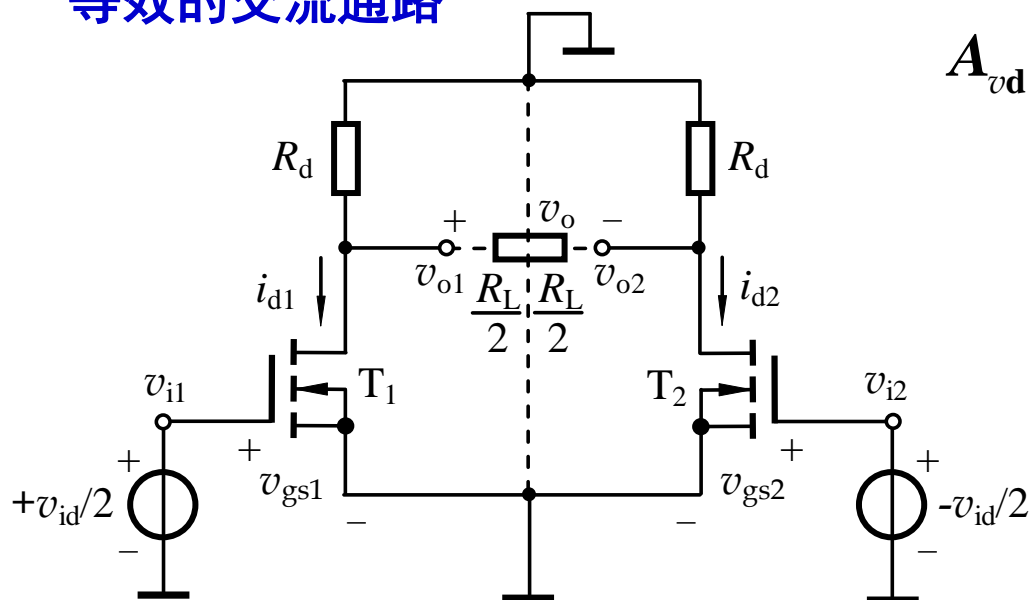
② 双端输出时的差模电压增益

$$A_{vd} = -g_m (R_d // \frac{R_L}{2})$$

若 $\lambda \neq 0$

等效的交流通路

$$A_{vd} = -g_m (r_{ds} // R_d // \frac{R_L}{2})$$

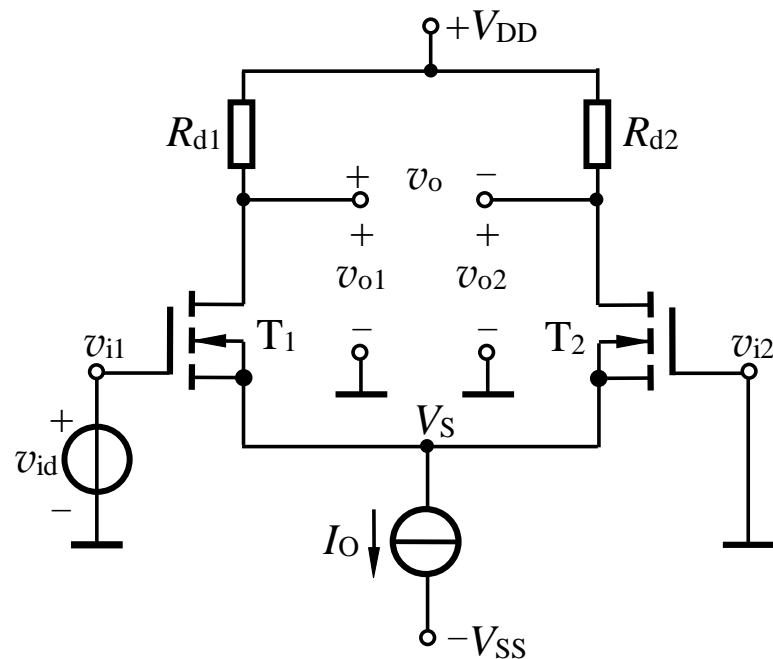
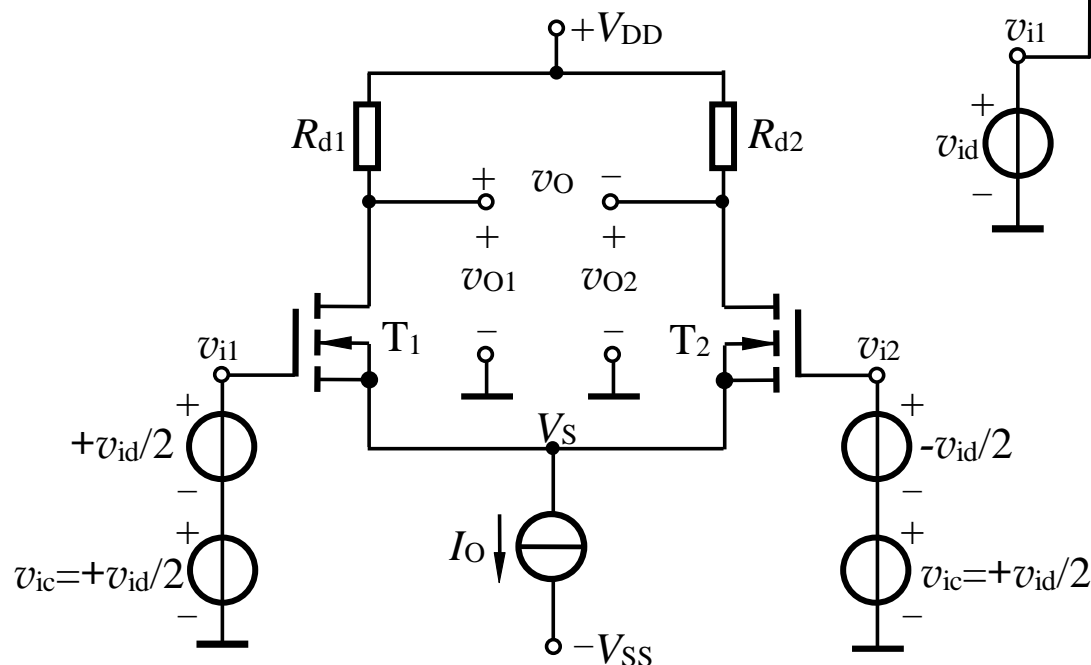


7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

单端输入（不对称输入）时

等效的输入形式

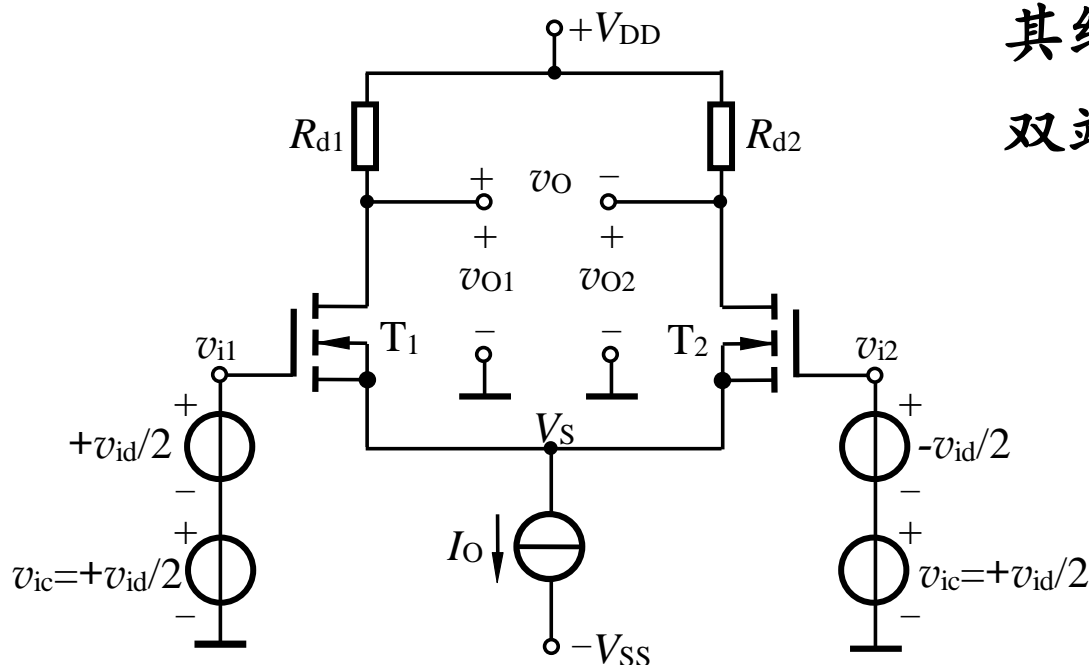


7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

单端输入（不对称输入）时

等效的输入形式



当仅考虑差模信号输入时，将两个共模信号源置零，即 $v_{ic} = 0$ ，其结果与上述差模信号双端输入时完全相同。

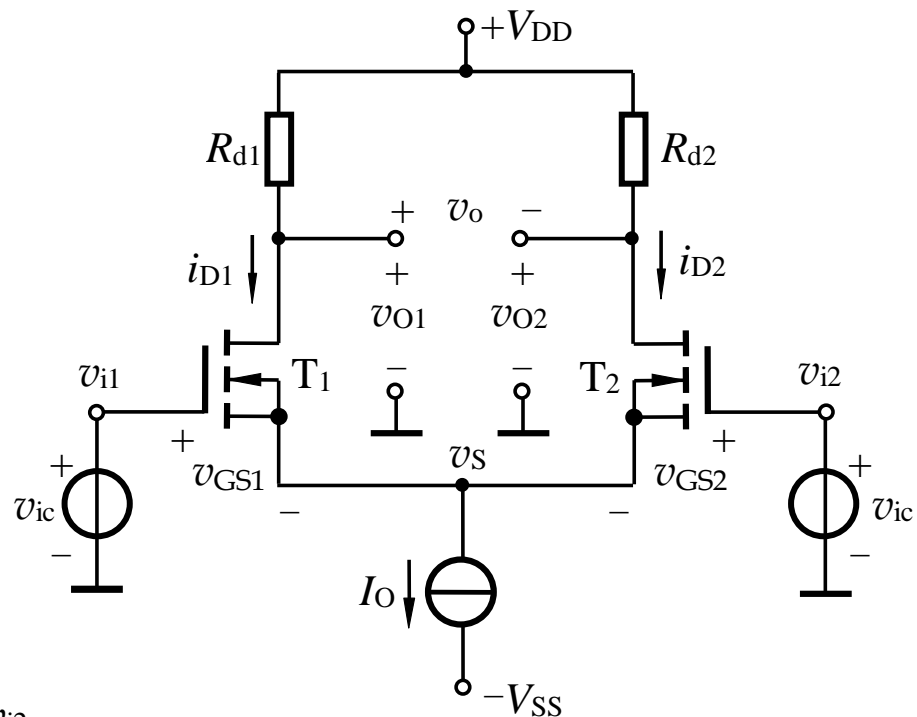
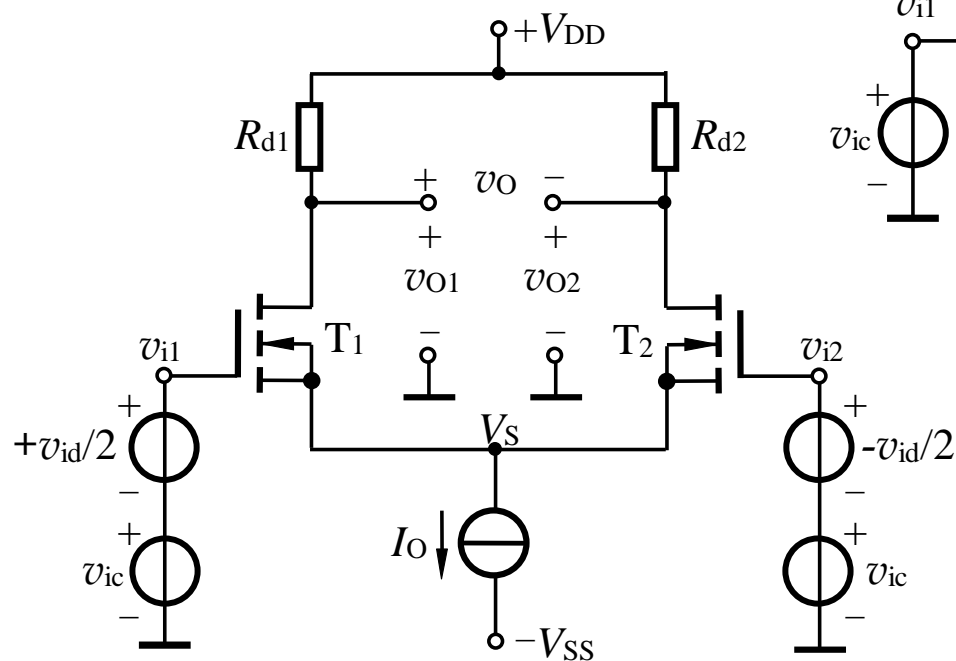
结论：单端输入时的差模情况等效于双端输入，差模增益指标的计算与双端输入时相同。

单端输入时，必定伴随着共模信号的输入。

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入共模信号时

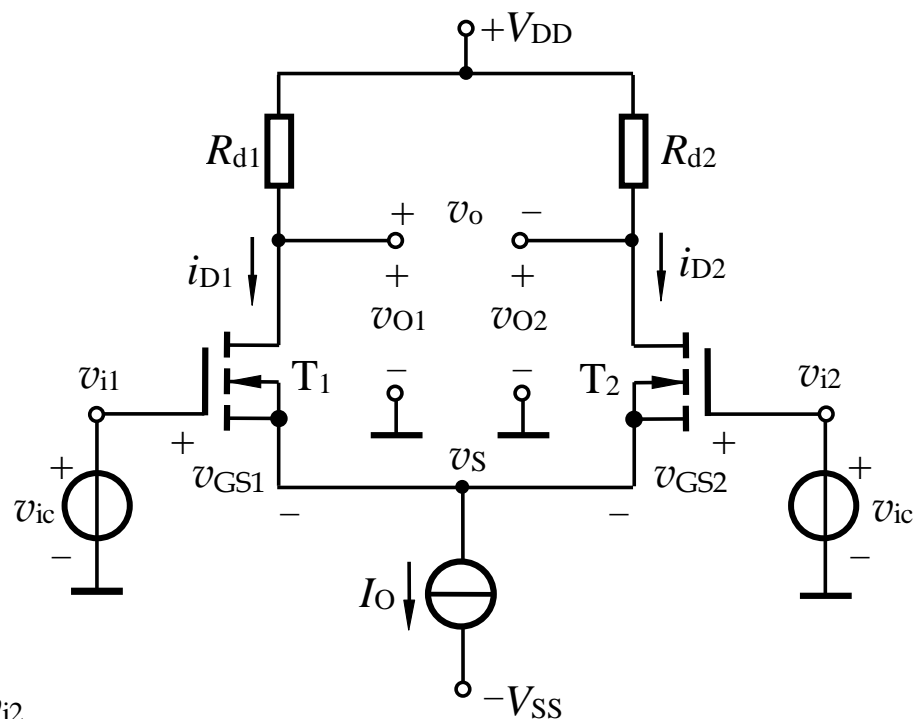
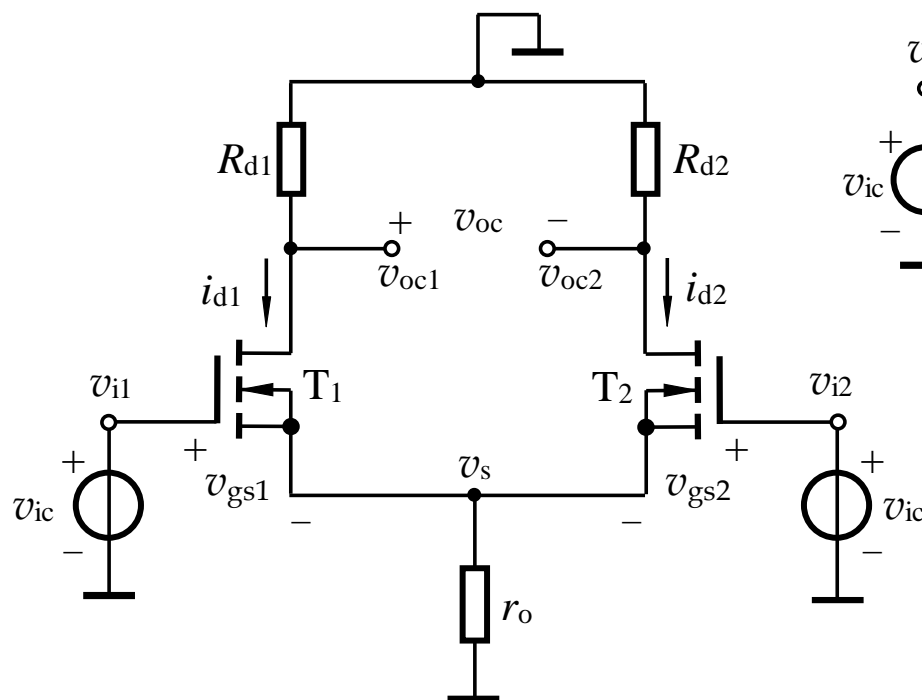


7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入共模信号时

交流通路

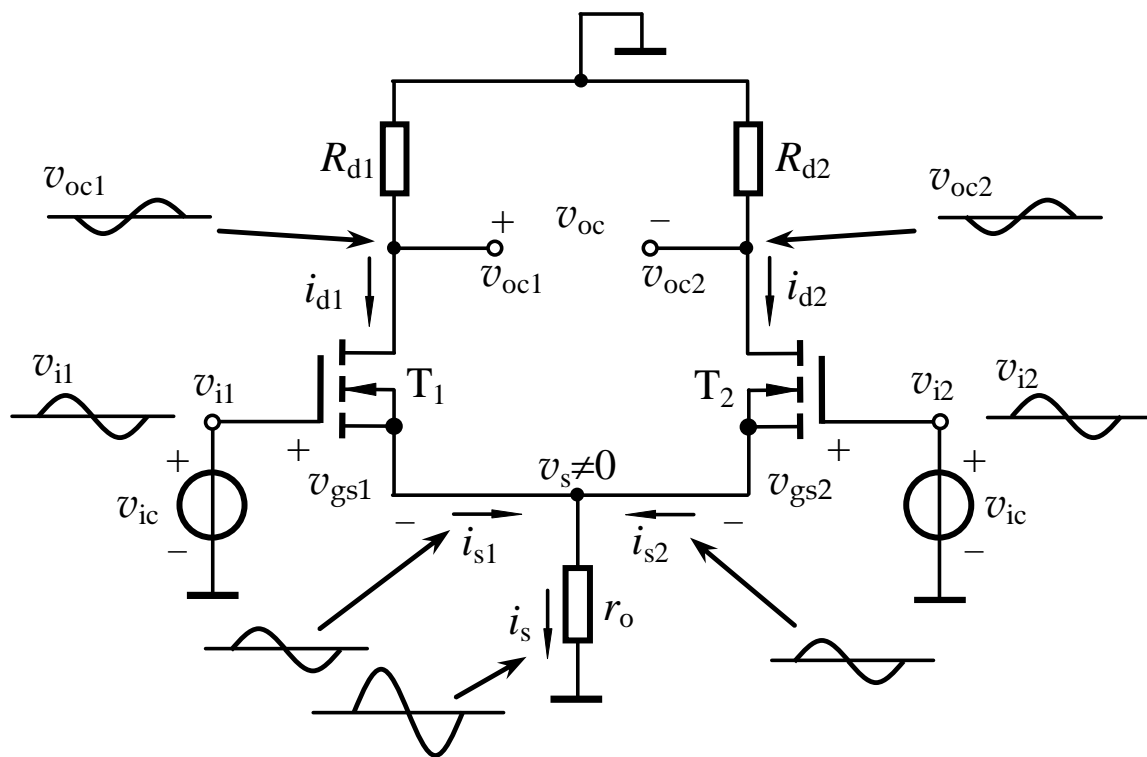


7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入共模信号时

v_{i1} 和 v_{i2} 大小相等，相位相同。
 i_{s1} 和 i_{s2} 同时等量增加或等量减小， r_o 中流过双倍的单边交流电流， $v_s \neq 0$ 。



共模信号作用情况

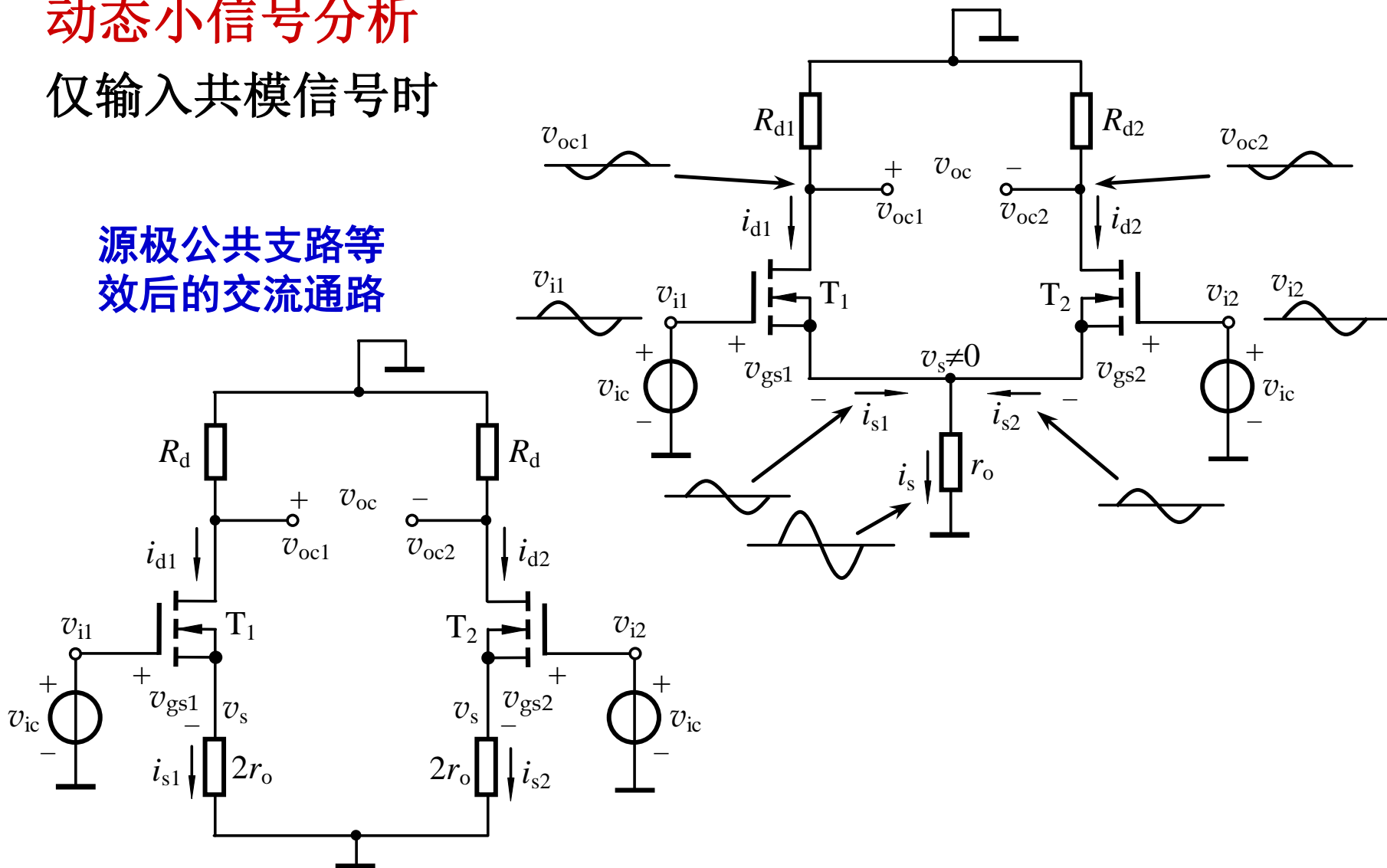
将 r_o 折算到 T_1 和 T_2 各自源极支路上，其阻值相当于原来的两倍。

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入共模信号时

源极公共支路等效后的交流通路



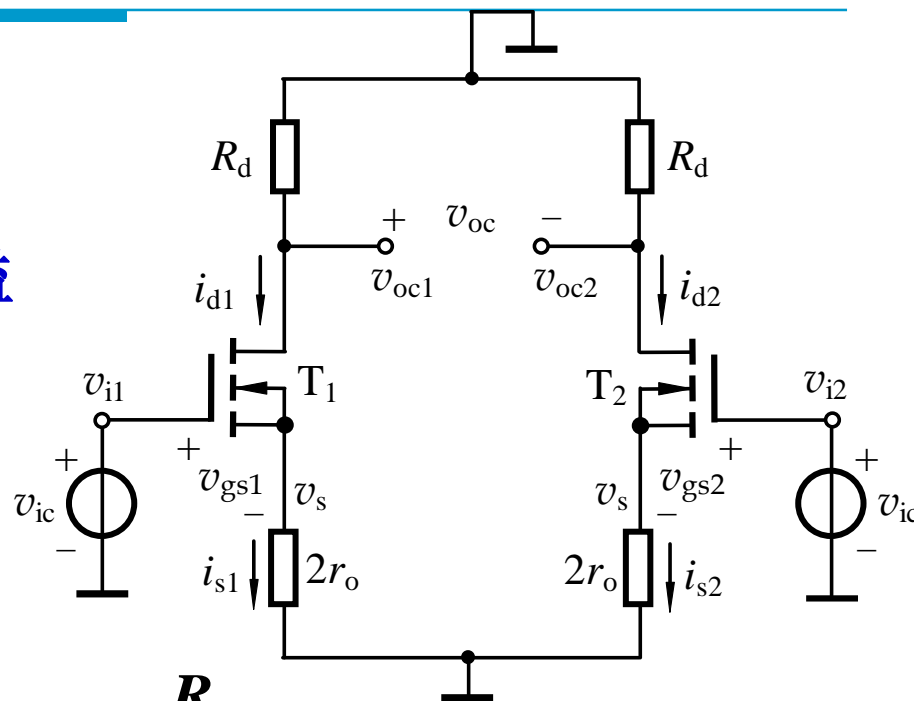
7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入共模信号时

③ 单端输出时的共模电压增益

电路左右两边完全对称，
可看作两个独立的共源放大电
路，两边单端输出完全相同。



$$A_{vc1} = \frac{v_{oc1}}{v_{ic}} = \frac{v_{oc2}}{v_{ic}} = \frac{-g_m R_d}{1 + g_m (2r_o)} \approx -\frac{R_d}{2r_o} \quad \text{远小于差模增益}$$

$r_o \uparrow \rightarrow A_{vc1} \downarrow$ r_o 是电流源的输出电阻（内阻）

无论由哪个漏极输出，共模输出电压总是与共模输入电压反相。

共模时有单端输入和双端输入之分吗？

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

仅输入共模信号时

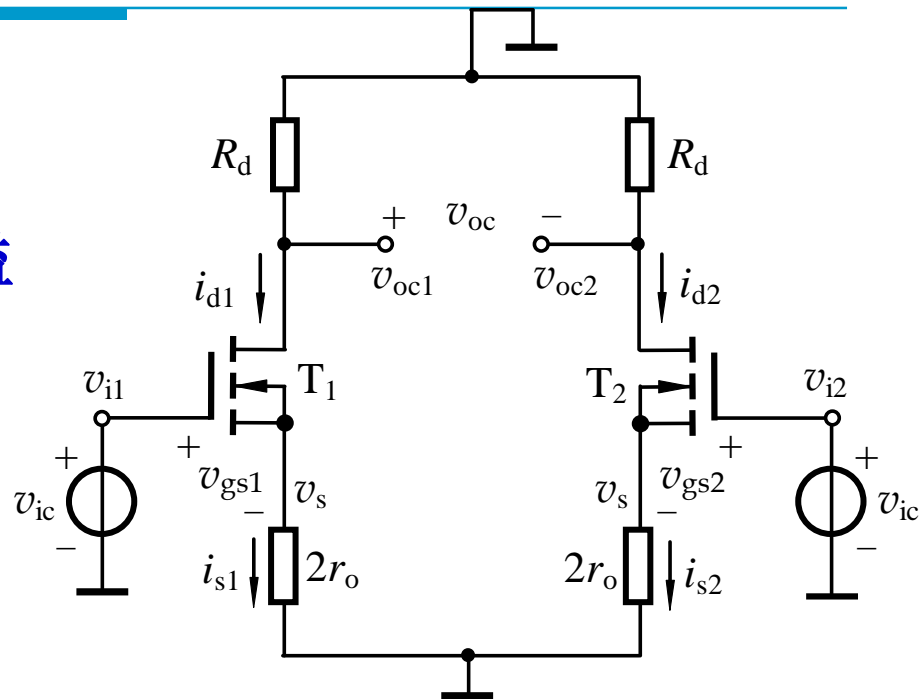
④ 双端输出时的共模电压增益

共模信号的输入使两管漏极电压有相同的变化

理想情况下有

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

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

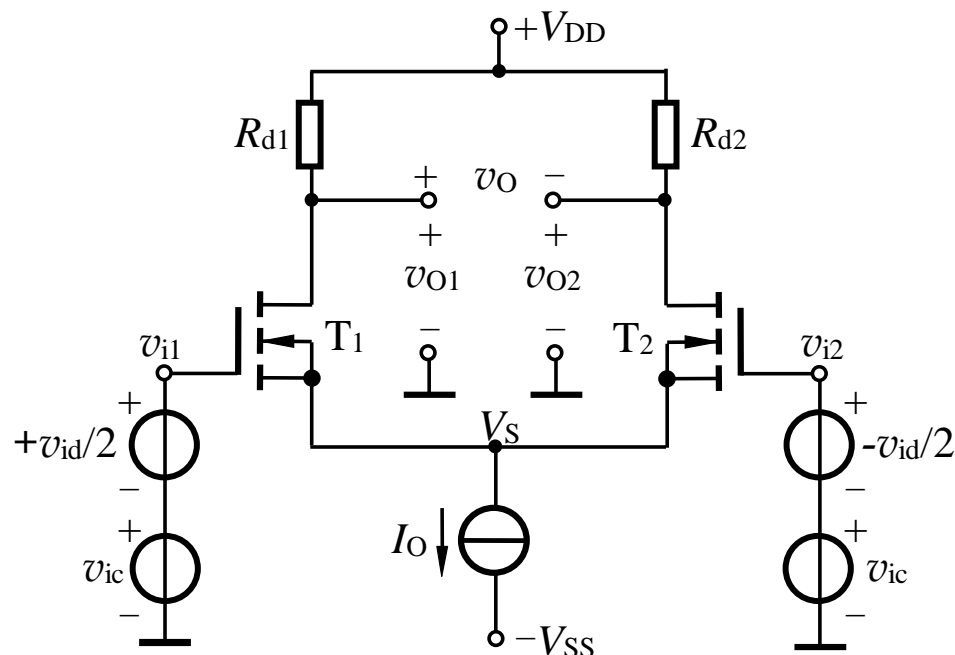


7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

温度变化和电源电压波动，都将使两个漏极电流产生变化，且变化大小和趋势相同。

其效果相当于在两个输入端加入了共模信号



当电路的共模增益为0或很小时，便可抑制由此产生的影响。

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

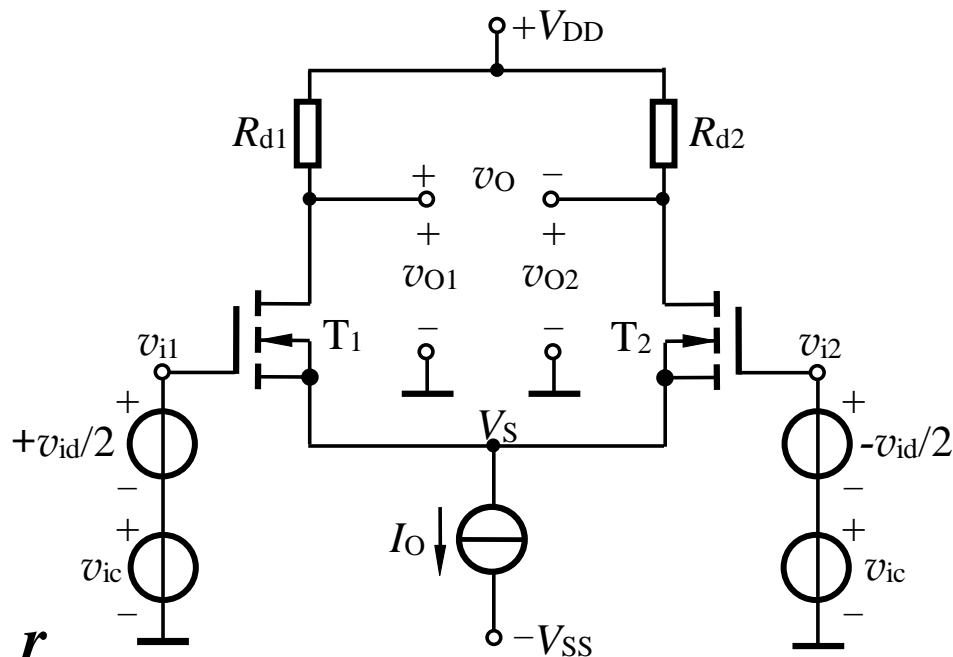
⑤共模抑制比

双端输出，理想情况

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = \infty$$

单端输出

$$K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{vd1}}{A_{vc1}} \right| \approx \frac{1 + 2g_m r_o}{2} \approx g_m r_o$$



➤ 为有效提高差分式放大电路的共模抑制比，应如何设计电路参数？

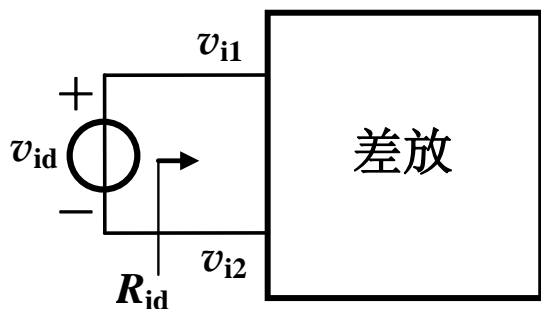
- 增大静态偏置电流源的内阻
- 提高电路的对称性

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

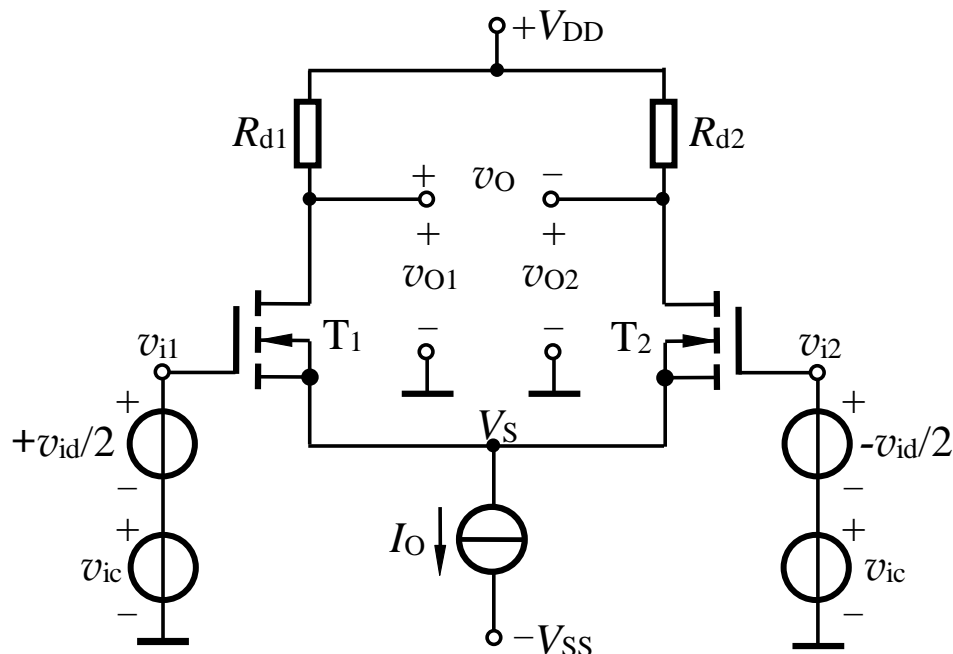
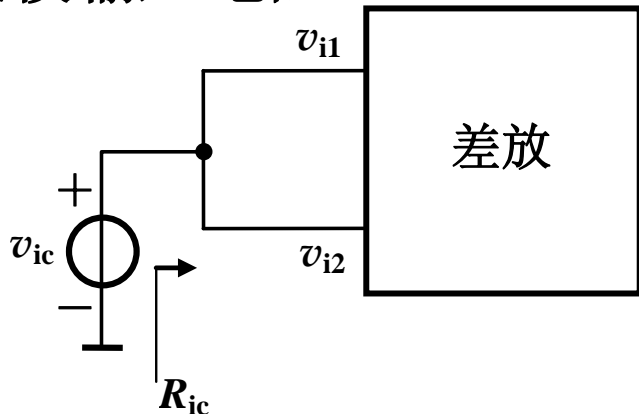
动态小信号分析

⑥输入电阻

差模输入电阻



共模输入电阻



由于MOS管的栅极是绝缘的，所以无论是差模信号的放大还是共模信号的放大，它们的输入电阻都约等于无穷大。**BJT**则不同。

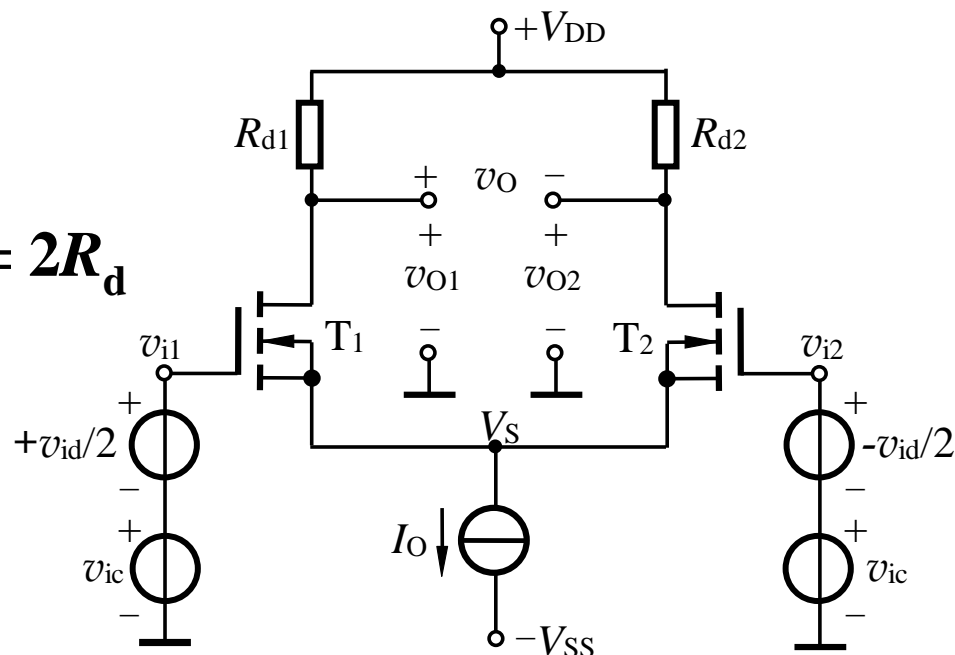
7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

⑦输出电阻

双端输出 $R_o = R_{d1} + R_{d2} = 2R_d$

单端输出 $R_o = R_d$



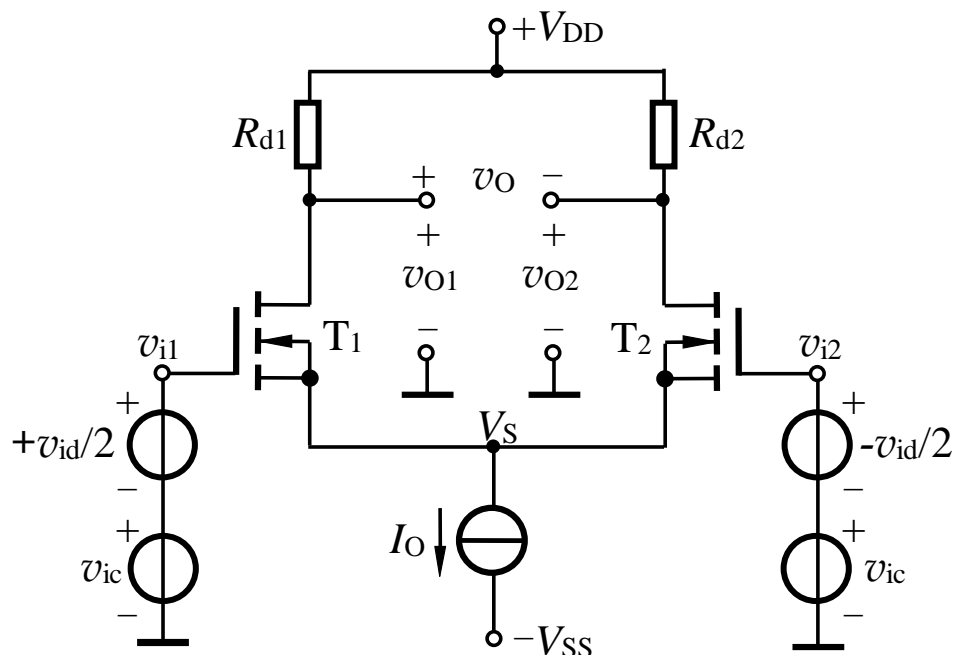
输出电阻无差模和共模之分

7.2.1 MOSFET差分式放大电路

动态小信号分析

⑧频率响应

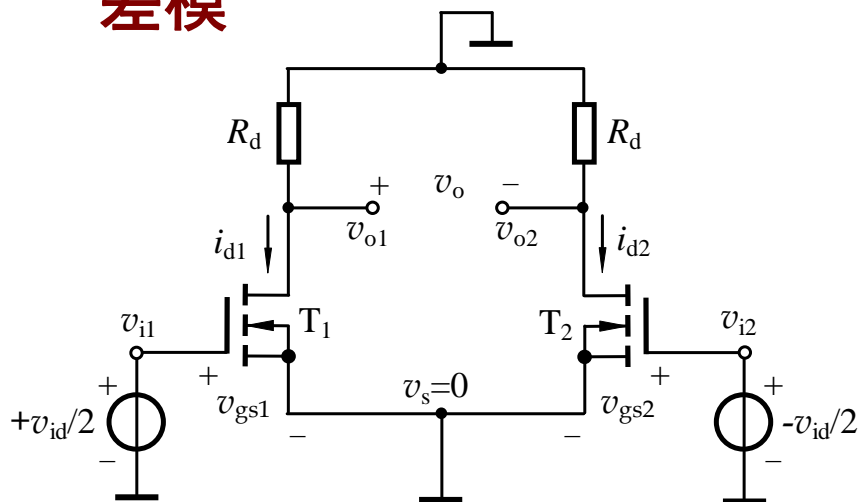
- 由于是直接耦合放大电路，所以低频区增益不会衰减
- 差模电压增益的高频响应与共源电路类似
- 共模电压增益的高频响应与源极电流源的输出阻抗（内阻）特性有直接关系
- 共模抑制比的高频响应由差模增益和共模增益的高频响应共同决定



7.2.1 MOSFET差分式放大电路

➤ 为什么对差模信号放大和对共模信号放大不同？

差模



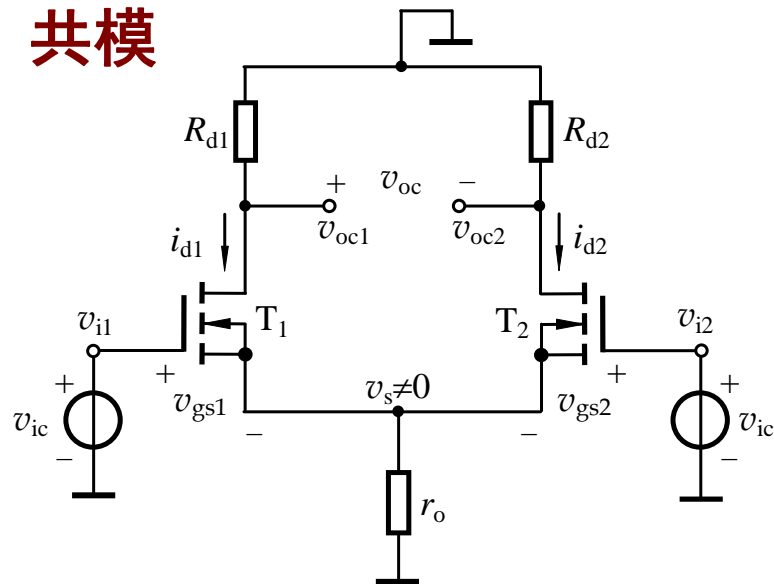
双端输出

$$A_{vd} = -g_m R_d$$

单端输出

$$A_{vd1} = -\frac{1}{2} g_m R_d$$

共模

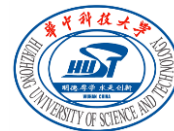


$$A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx 0$$

$$A_{vc1} = A_{vc2} = \frac{-g_m R_d}{1 + g_m (2r_o)} \approx -\frac{R_d}{2r_o}$$

➤ 对两类信号放大产生差异的关键点在哪儿？

7.2.1 MOSFET差分式放大电路



差分式放大电路的分析方法

- 静态、动态等与之前放大电路分析方法相同
- 动态分析时，利用叠加原理，将差模和共模分开分析是关键

? 思考题

差分式放大电路如图所示。分析下列输入和输出的相位关系：

v_{O1} 与 v_{i1} 反相

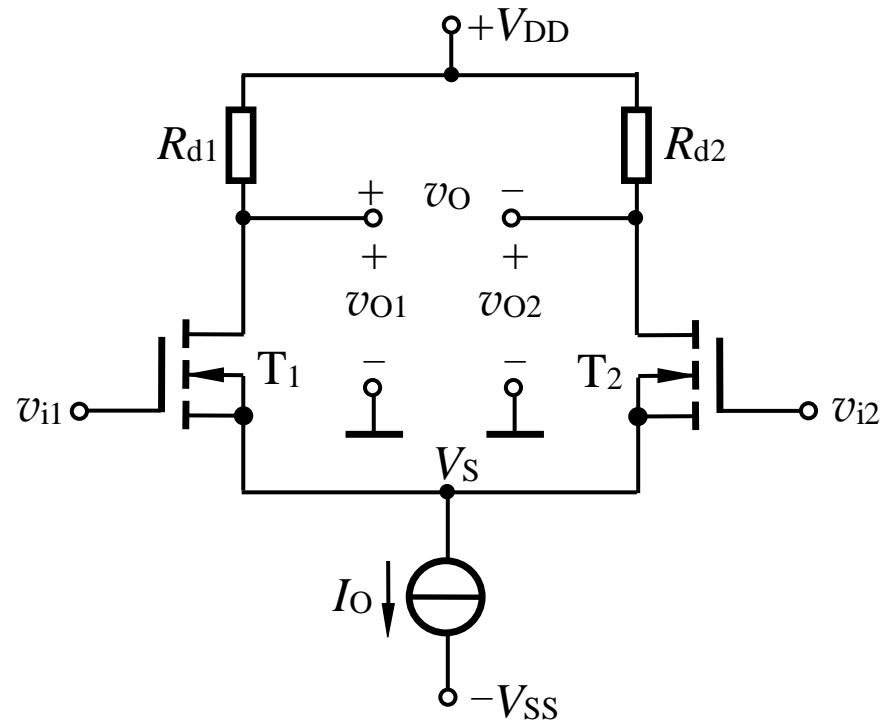
v_{O2} 与 v_{i1} 同相

v_{O1} 与 v_{i2} 同相

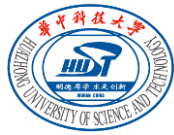
v_{O2} 与 v_{i2} 反相

v_O 与 v_{i1} 反相

v_O 与 v_{i2} 同相



7.2 差分式放大电路

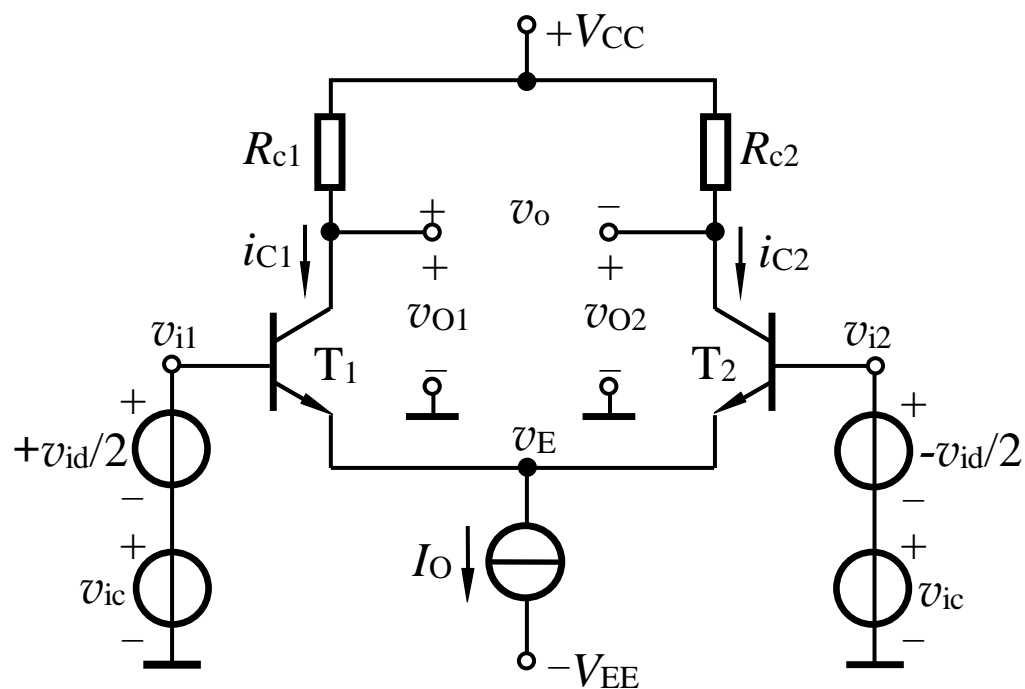


7.2.1 MOSFET差分式放大电路

7.2.2 BJT差分式放大电路

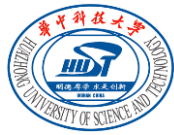
7.2.3 差分式放大电路的传输特性

7.2.2 BJT差分式放大电路



电路分析与MOSFET类似

7.2 差分式放大电路



7.2.1 MOSFET差分式放大电路

7.2.2 BJT差分式放大电路

7.2.3 差分式放大电路的传输特性

7.2.3 MOSFET差分式放大电路的传输特性



根据

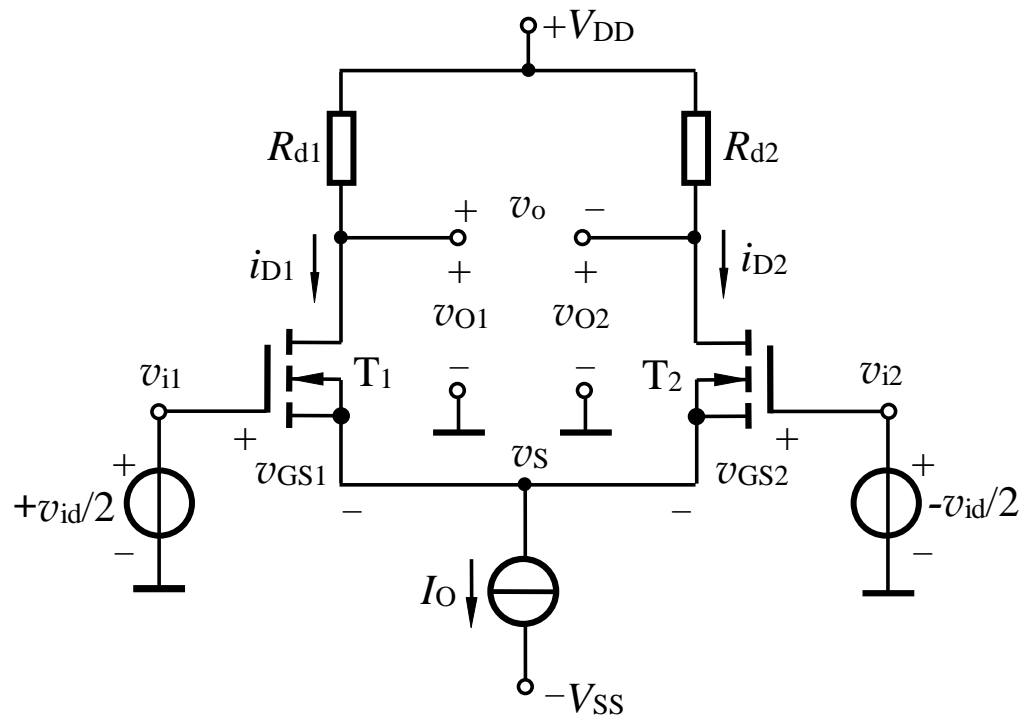
$$i_{D1} = K_n (v_{GS1} - V_{TN1})^2$$

$$i_{D2} = K_n (v_{GS2} - V_{TN2})^2$$

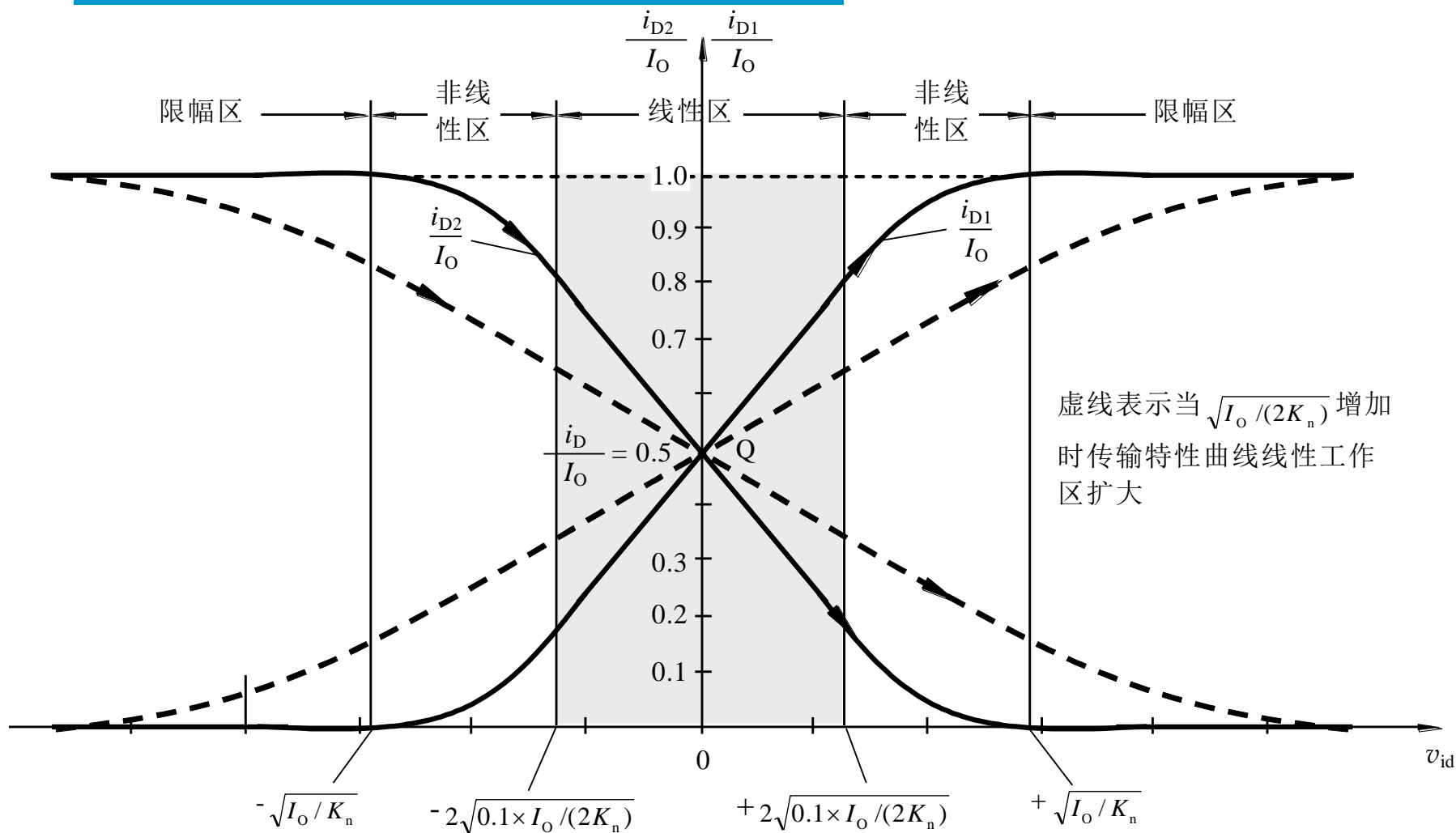
$$v_{id} = v_{GS1} - v_{GS2}$$

可得传输特性曲线

$$i_{D1}, i_{D2} = f(v_{id})$$

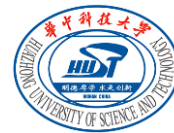


7.2.3 MOSFET差分式放大电路的传输特性



纵轴归一化传输特性

7 模拟集成电路



7.1 模拟集成电路中的直流偏置技术

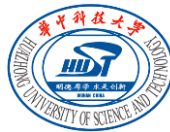
7.2 差分式放大电路

***7.3 带有源负载的差分式放大电路**

7.4 集成运算放大器电路简介

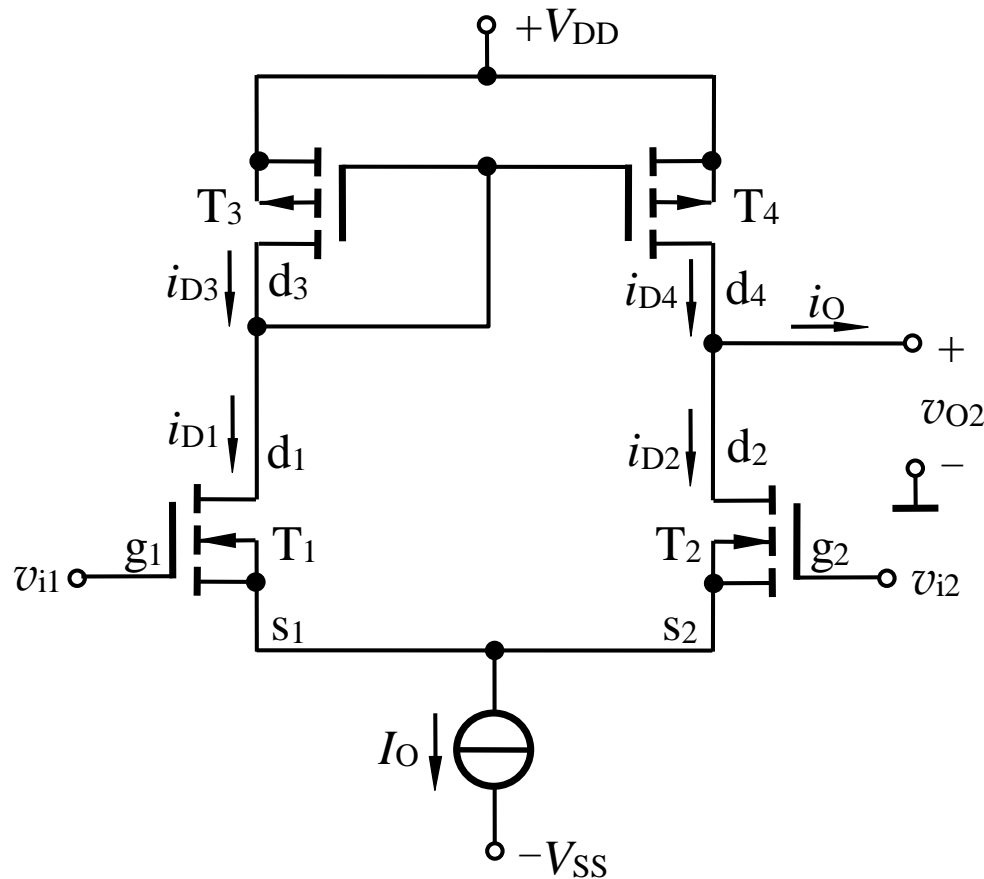
7.5 运放主要参数和相关应用问题

*7.3.1 带有源负载的MOSFET差分式放大电路

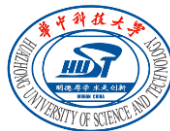


1. 基本电路

2. 静态分析

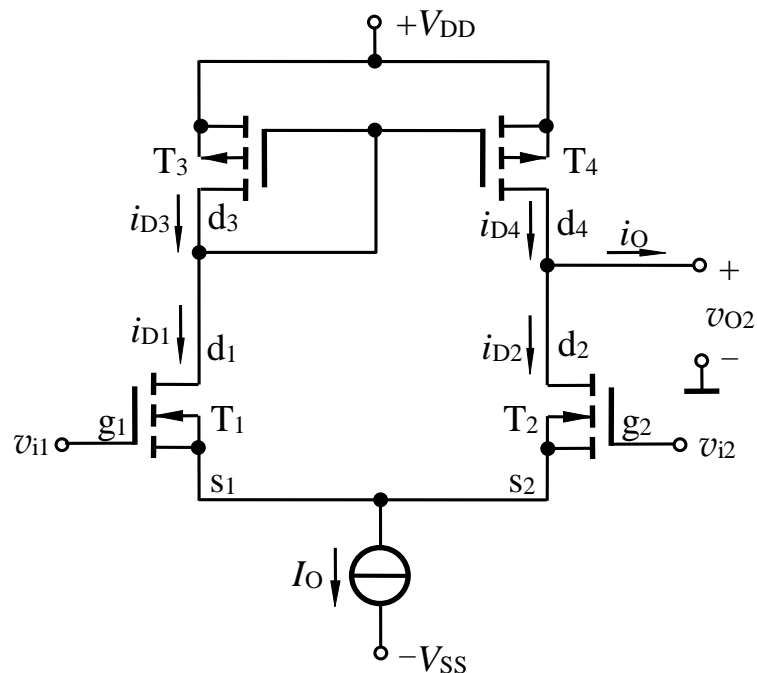
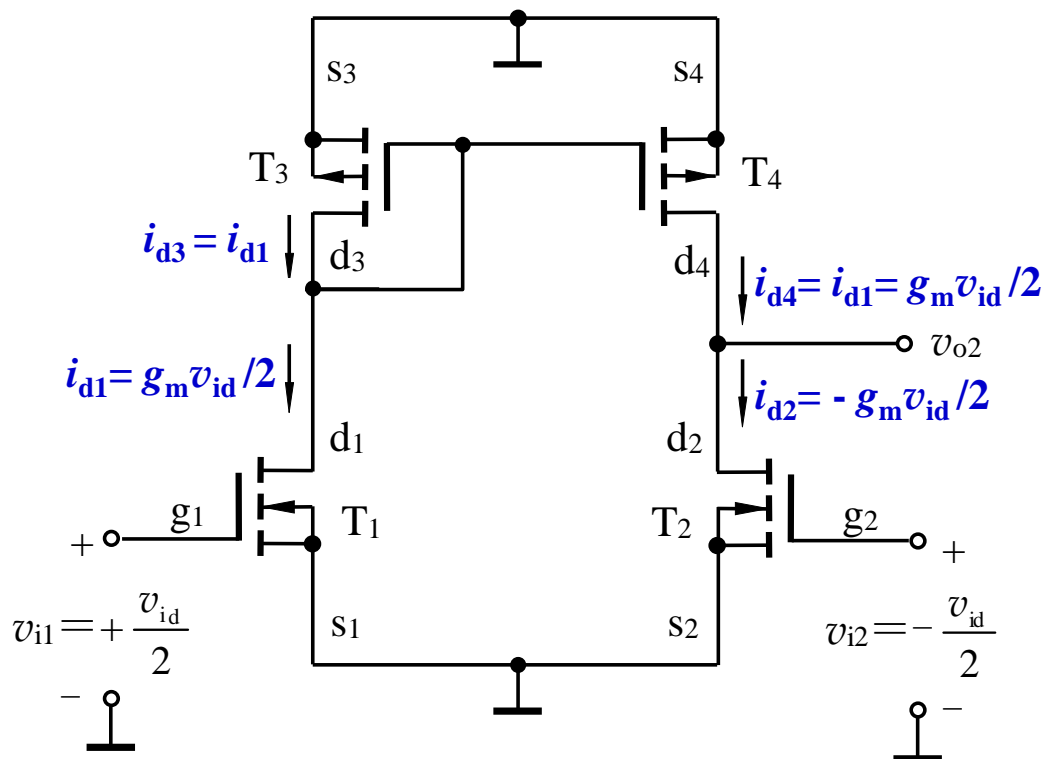


*7.3.1 带有源负载的MOSFET差分式放大电路



3. 动态指标

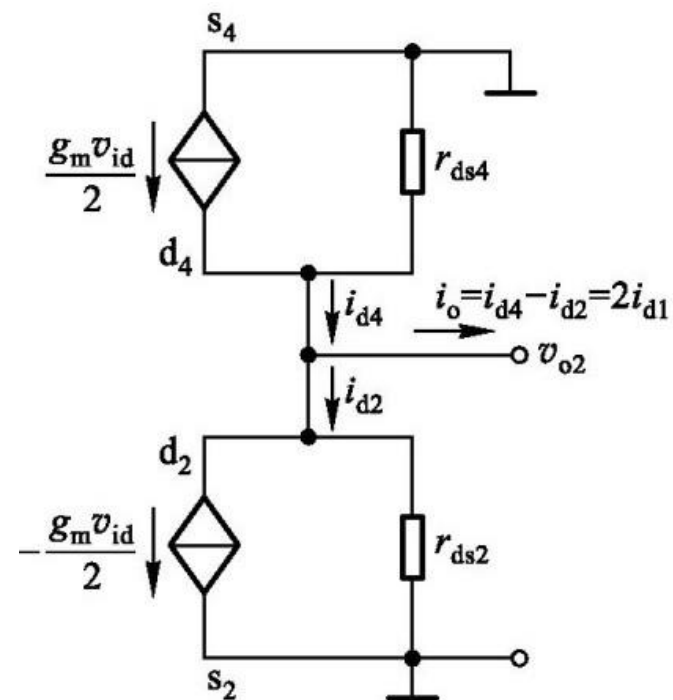
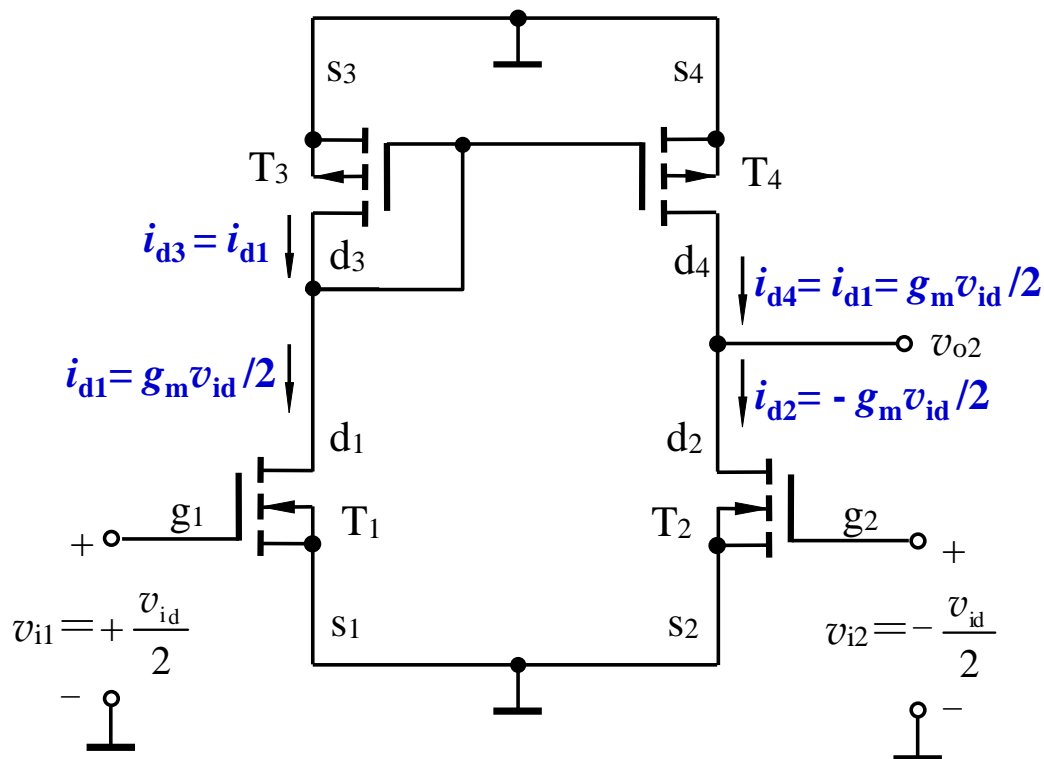
输入差模电压时的交流通路



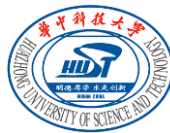
*7.3.1 带有源负载的MOSFET差分式放大电路

3. 动态指标

$\lambda \neq 0$ 时, 可得 T_2 、 T_4 支路的小信号等效电路



*7.3.1 带有源负载的MOSFET差分式放大电路



3. 动态指标

节点 d_2 (d_4) 的KCL方程为

$$g_m \left(\frac{v_{id}}{2} \right) - g_m \left(-\frac{v_{id}}{2} \right) - \frac{v_{o2}}{r_{ds2}} - \frac{v_{o2}}{r_{ds4}} = 0$$

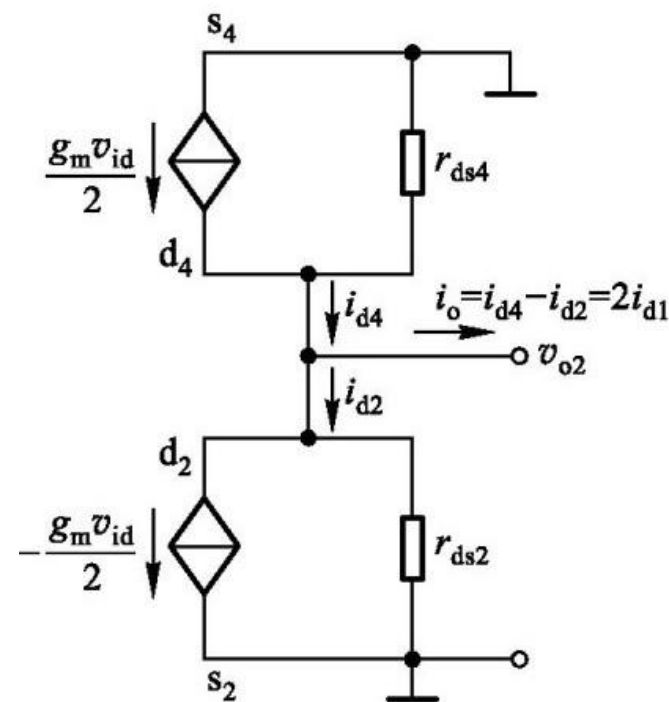
得差模电压增益 $A_{vd2} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = g_m (r_{ds2} // r_{ds4})$

其中 $r_{ds2} = \frac{1}{\lambda_2 I_{D2}}$ $r_{ds4} = \frac{1}{\lambda_4 I_{D4}}$

若接负载 R_L , 则电压增益为

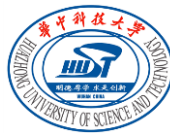
$$A_{vd2} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = g_m (r_{ds2} // r_{ds4} // R_L)$$

$\lambda \neq 0$ 时, 可得 T_2 、 T_4 支路的小信号等效电路



带有源负载的差分放大电路单端输出的差模电压增益不再是双端输出增益的一半, 而是与双端输出电压增益相同, 即单端输出等效于双端输出。

*7.3.1 带有源负载的MOSFET差分式放大电路



3. 动态指标

以上分析结果的前提条件是假设 $T_1 \sim T_4$ 的互导相同，即

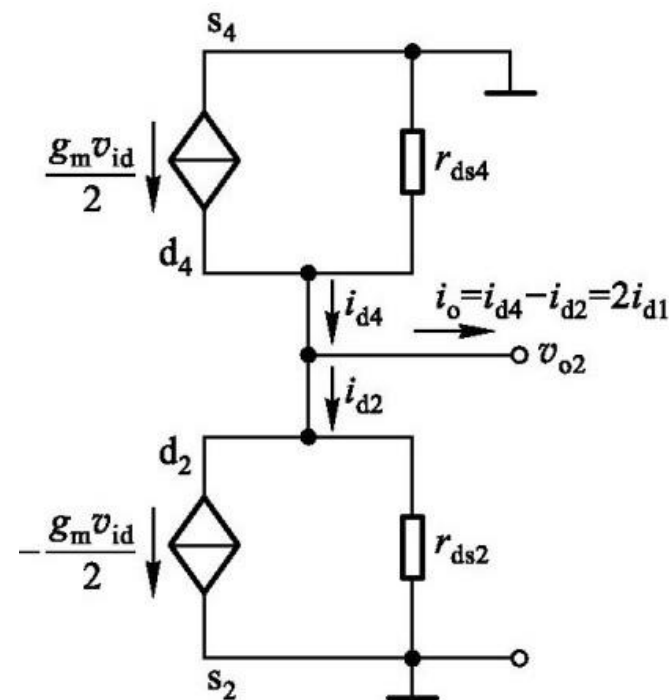
$$K_{n1} = K_{n2} = K_{p3} = K_{p4} = K$$

$$g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_{m4} = g_m$$

参数不同时，结果将有所变化

电路的共模电压增益仍然很小，共模抑制很高

$\lambda \neq 0$ 时，可得 T_2 、 T_4 支路的小信号等效电路



7 模拟集成电路



7.1 模拟集成电路中的直流偏置技术

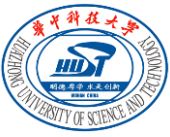
7.2 差分式放大电路

*7.3 带有源负载的差分式放大电路

7.4 集成运算放大器电路简介

7.5 运放主要参数和相关应用问题

7.4 集成运算放大器电路简介



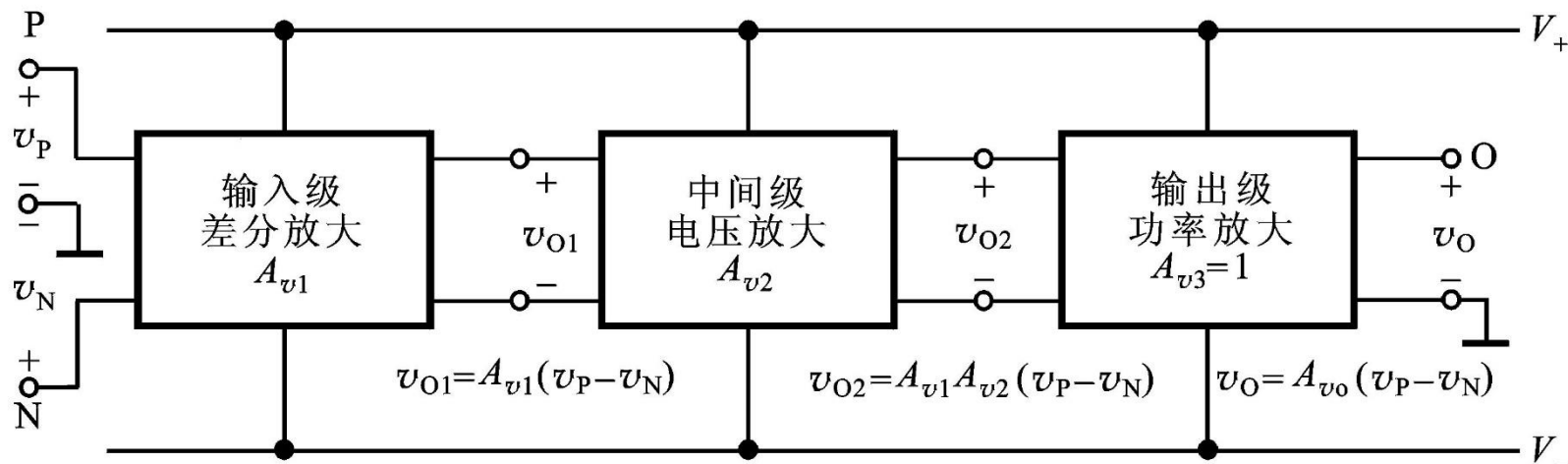
7.4.1 两级CMOS运算放大器

7.4.2 BJT型集成运算放大器741

7.4.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

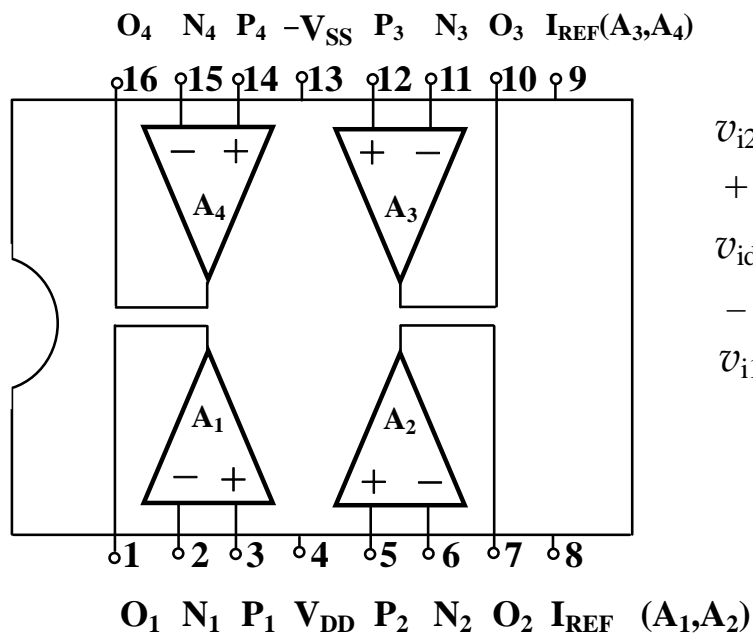
7.4 集成运算放大器电路简介

集成运放的基本构成

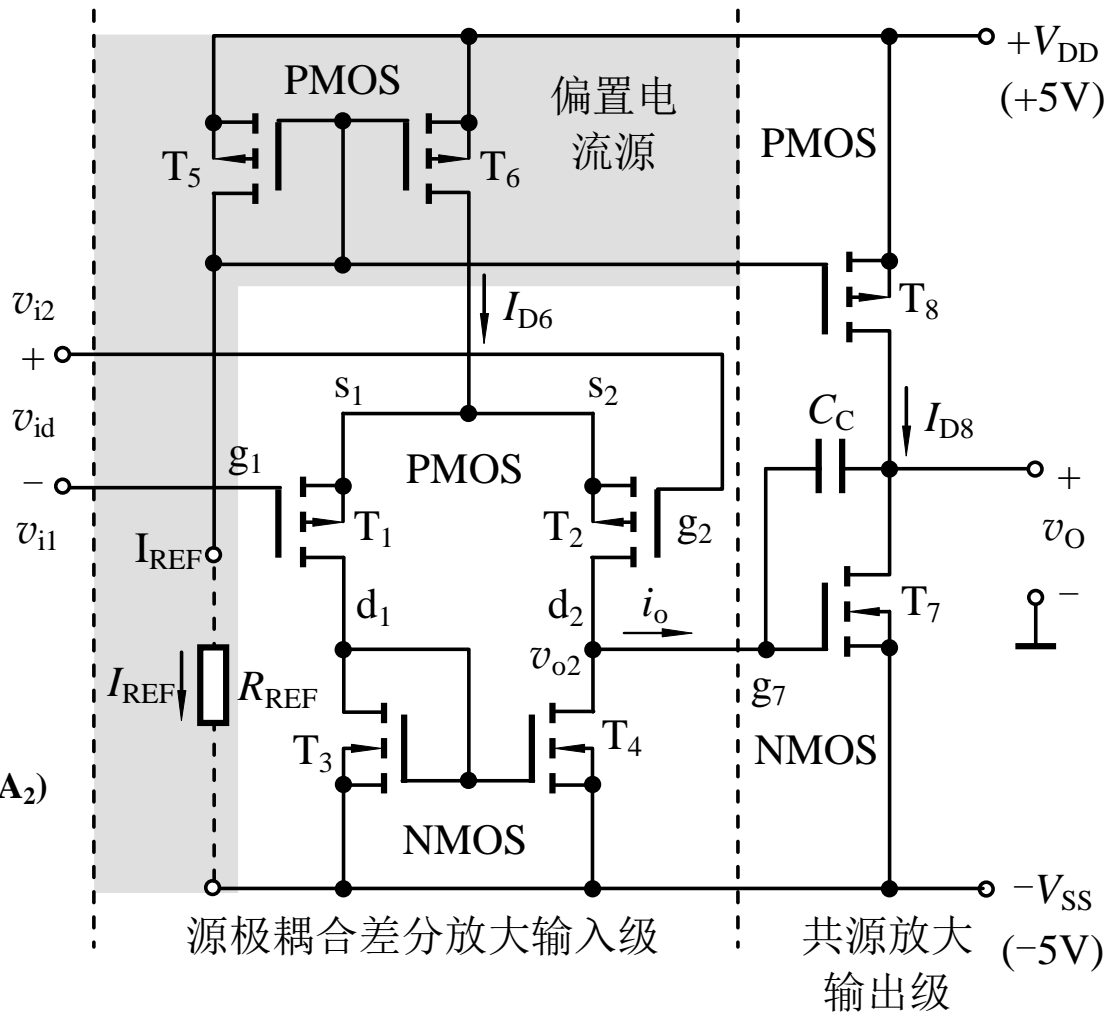


7.4.1 两级CMOS运算放大器

1. 电路结构和工作原理



引脚排列顶视图



7.4.1 两级CMOS运算放大器

2. 小信号差模电压增益

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

设 $g_{m1} = g_{m2} = g_m$

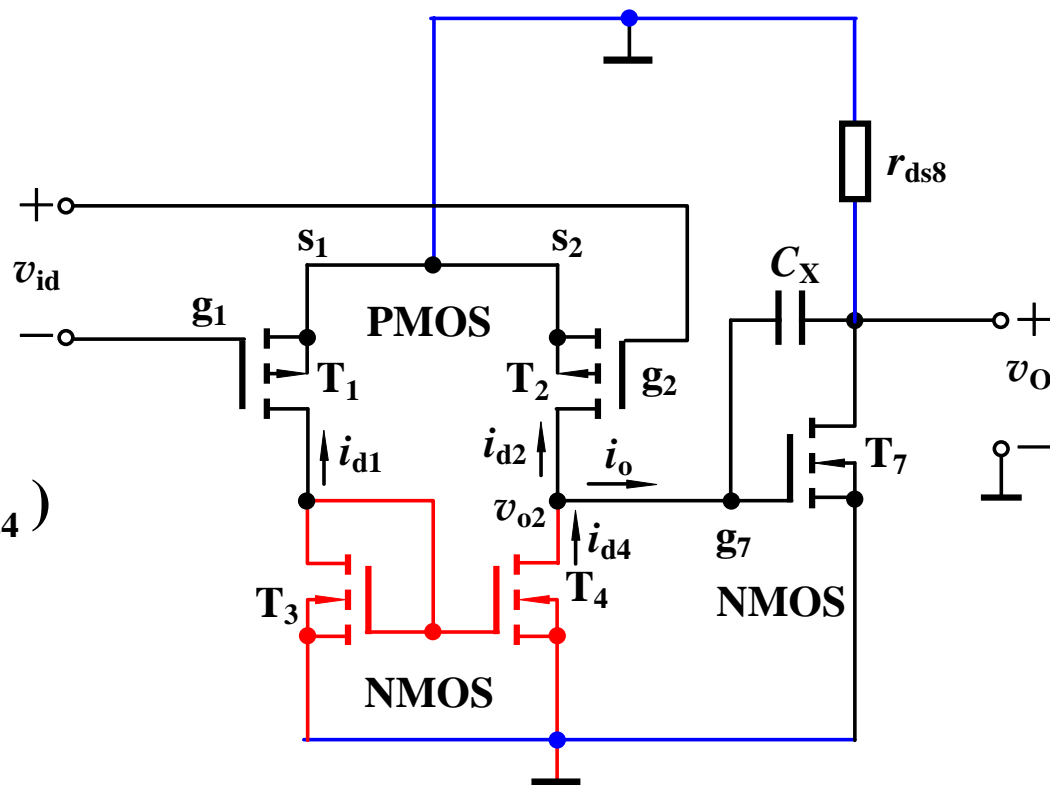
则输入级电压增益

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

第二级电压增益

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

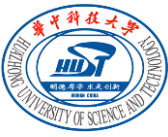
总电压增益 $A_v = A_{v1} \cdot A_{v2}$



将参数代入计算得

$$A_v = 40804 \quad (92.2 \text{ dB})$$

7.4 集成运算放大器电路简介

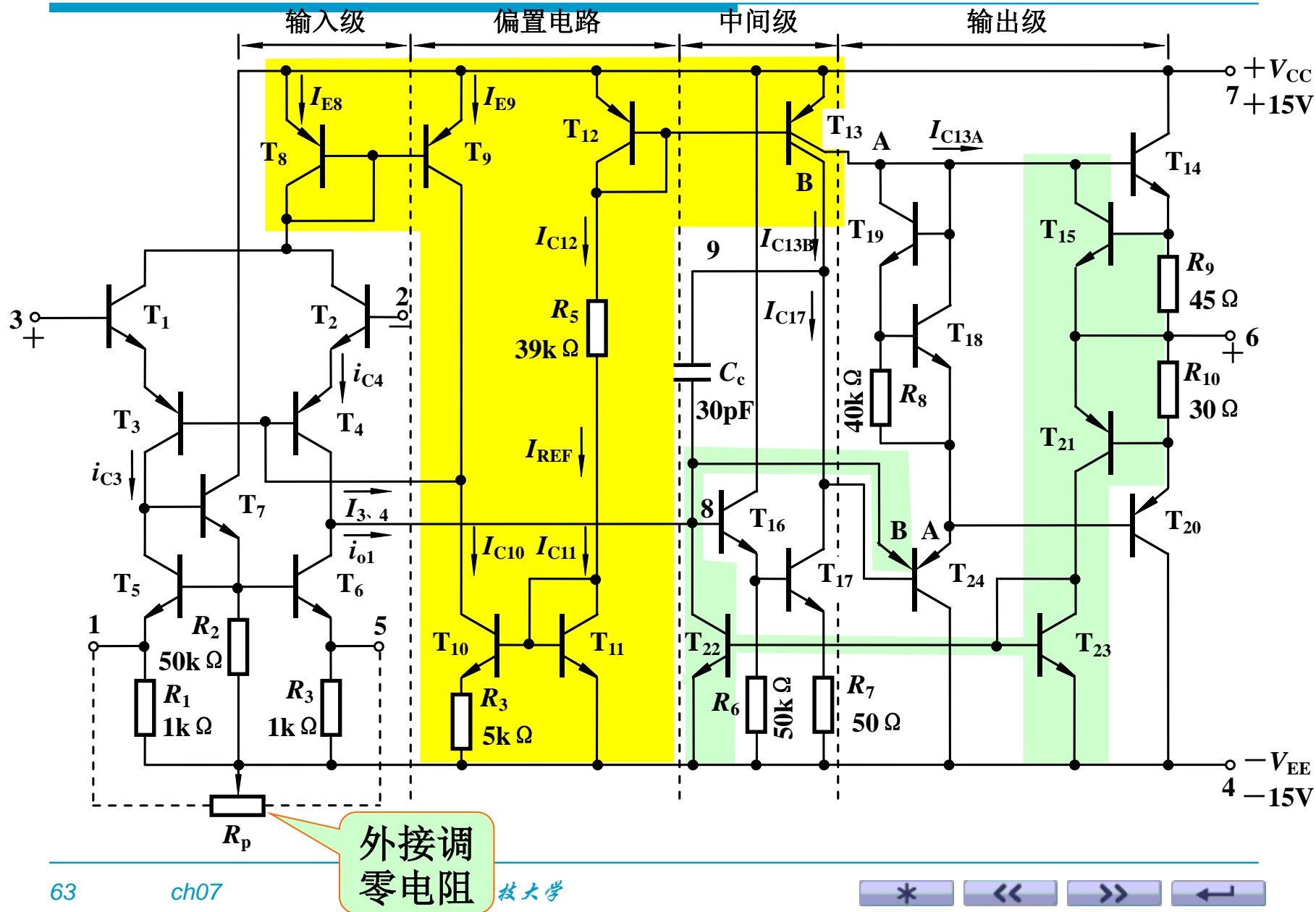


7.4.1 两级CMOS运算放大器

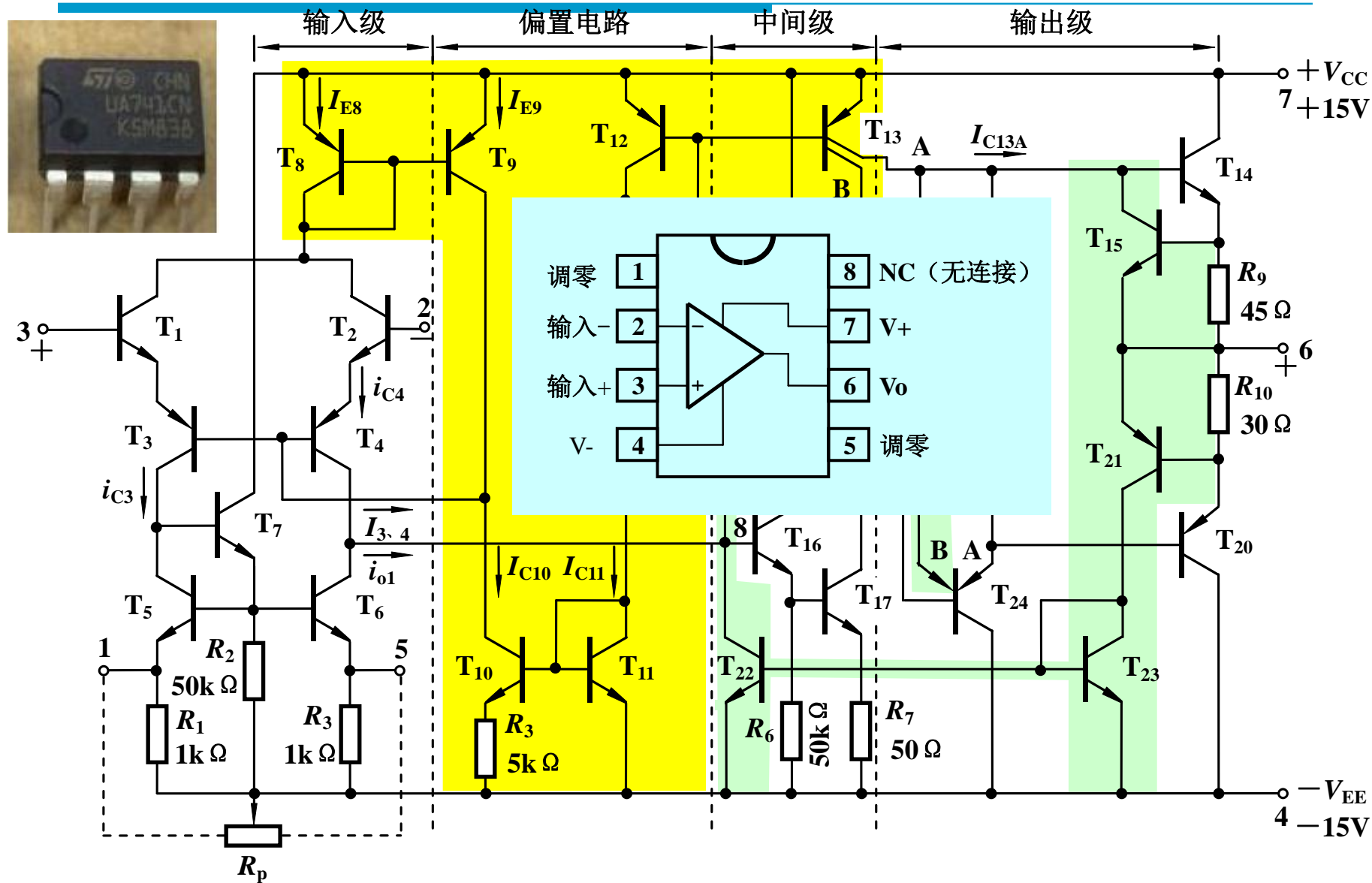
7.4.2 BJT型集成运算放大器741

7.4.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

7.4.2 BJT型集成运算放大器741

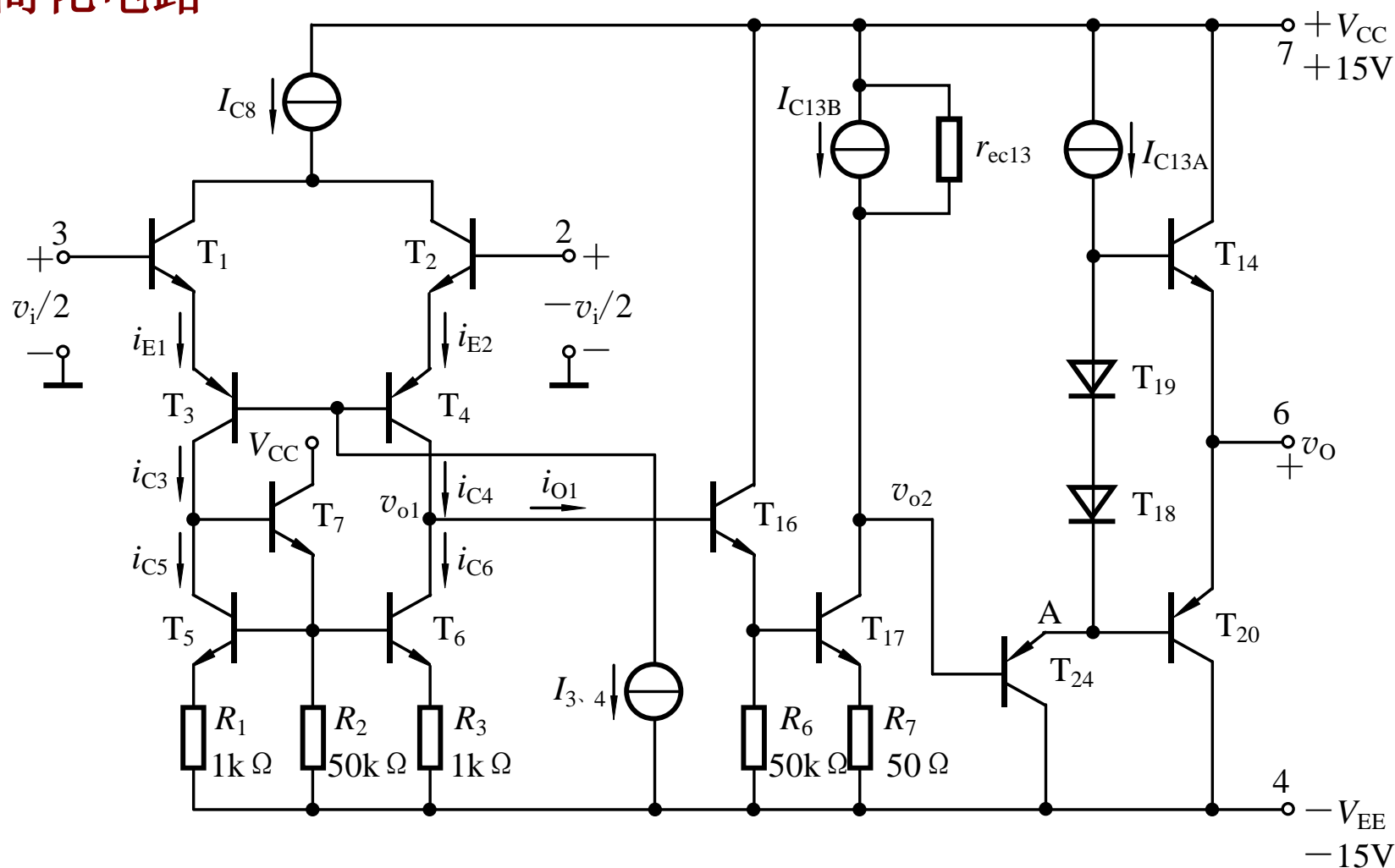


7.4.2 BJT型集成运算放大器741

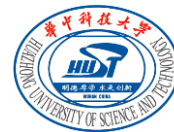


7.4.2 BJT型集成运算放大器741

简化电路



7.4 集成运算放大器电路简介



7.4.1 两级CMOS运算放大器

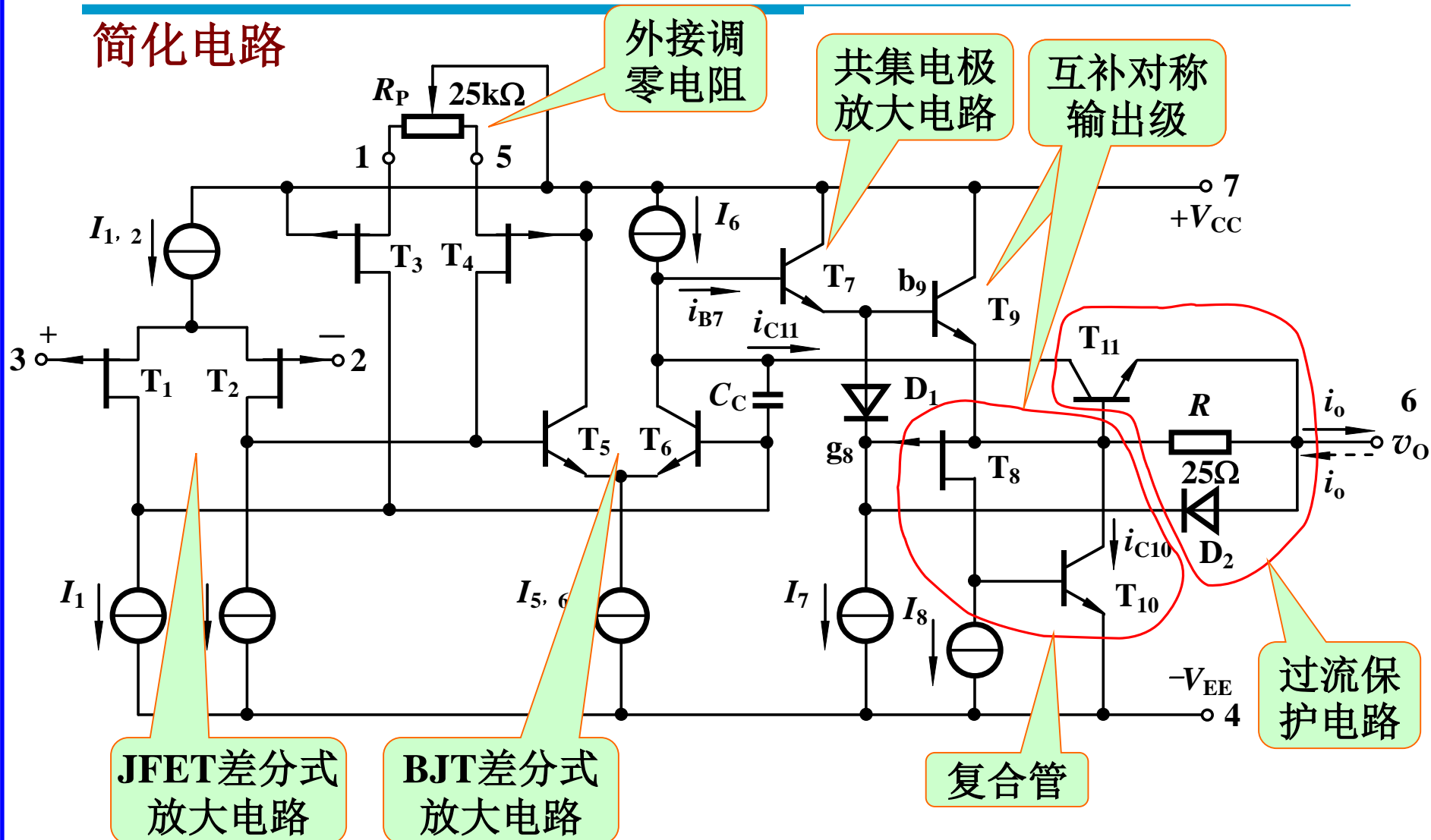
7.4.2 BJT型集成运算放大器741

7.4.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

7.4.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

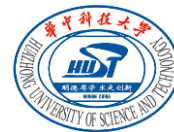


简化电路



很高的输入电阻，很低的输入偏置电流，高速、宽带和低噪声

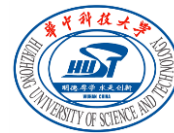
7.4 集成运算放大器电路简介



集成运放的一般结构及特点：

- 差分式输入级有很高的共模抑制比和很大的输入电阻
- 中间级提供很高的增益
- 输出级有很小的输出电阻和很强的带载能力
- 采用直接耦合方式
- 电流源提供静态偏置
- 有过载保护电路

7 模拟集成电路



7.1 模拟集成电路中的直流偏置技术

7.2 差分式放大电路

*7.3 带有源负载的差分式放大电路

7.4 集成运算放大器电路简介

7.5 运放主要参数和相关应用问题

7.5 运放主要参数和相关应用问题

7.5.1 主要参数

- 输入直流误差特性（输入失调特性）
- 差模特性
- 共模特性
- 大信号动态特性
- 电源特性

7.5.2 相关应用问题

- 集成运放的选用
- 失调电压 V_{IO} 、失调电流 I_{IO} 和偏置电流 I_{IB} 带来的误差
- 有限带宽对高增益带宽积放大电路设计的影响
- 轨到轨（rail-to-rail）输入/输出运放的优势
- 运放使用中输入端的直流通路
- 运放在单电源下工作

输入直流误差特性（输入失调特性）

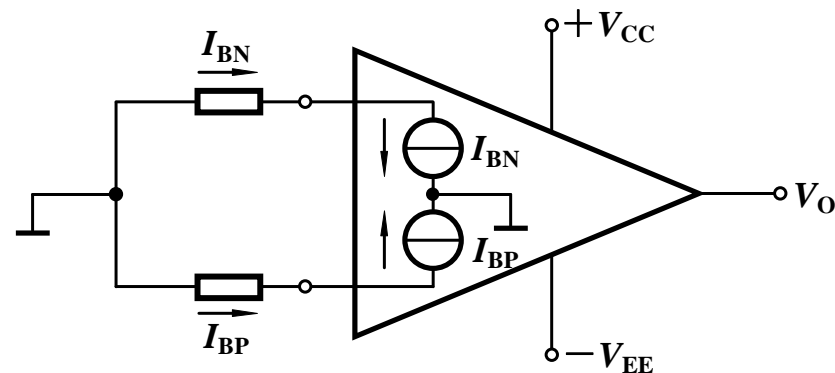
1. 输入失调电压 V_{IO}

输入电压为零时，为了使输出电压为零，在输入端加的补偿电压。一般约为 $1\mu\text{V} \sim 1\text{mV}$ 。BJT工艺的运放该值通常小于MOS工艺的运放。

2. 输入偏置电流 I_{IB}

集成运放两个输入端静态电流的平均值

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



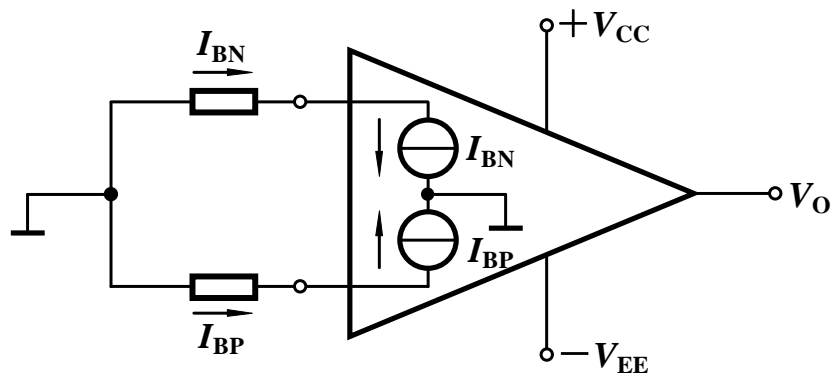
BJT为 $10\text{nA} \sim 1\mu\text{A}$ ；MOSFET运放 I_{IB} 在 fA 至 pA 数量级。

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 $I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}|$ 。

一般与 I_{IB} 接近。



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 $\Delta I_{IO} / \Delta T$

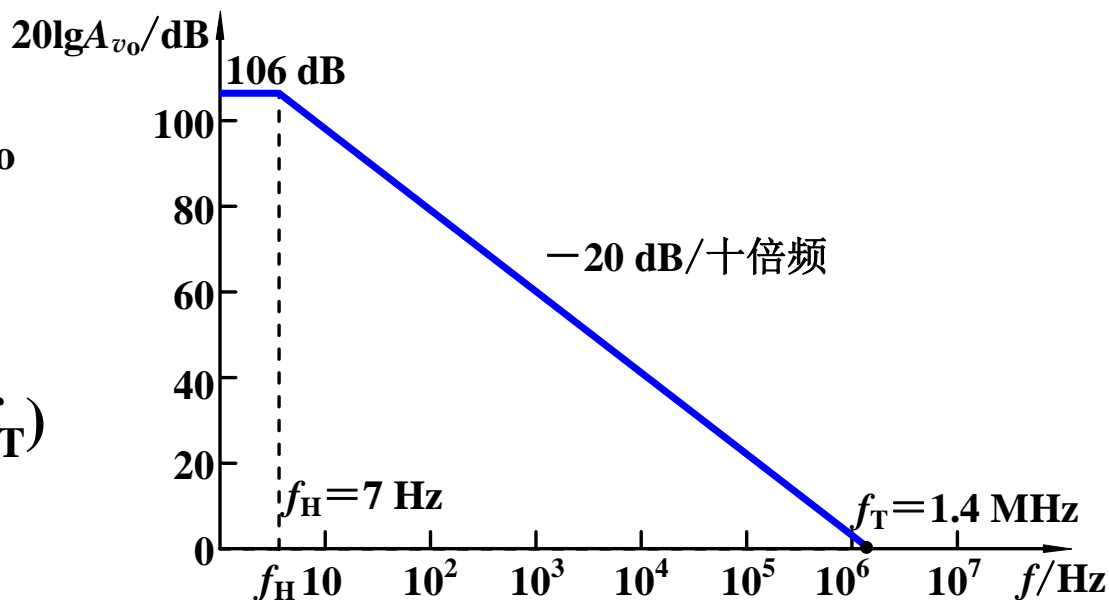
差模特性

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

目前高速运放要求 $f_T > 50\text{MHz}$ ，如AD801的 $f_T = 800$ MHz。

宽带运放如OPA657C (FET输入级) $A_{v0} f_H = 1600$ MHz。

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 $r_{id} > 10^{11}\Omega$
- 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}

指集成运放的反相和同相输入端之间所能承受的最大差模电压值。

4. 最大输出电压 V_{omax} (输出摆幅)

目前很多运放的最大输出电压可接近电源电压，即 **RRO (Rail-to-Rail Output)** 输出特性，可大幅提高电源效率，有利于低压电源或电池供电的应用。

具有**RRO**特性的运放一般只适合于较大负载电阻的微功率电路。

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}

运放作为电压跟随器时，使输出电压产生1%跟随误差的共模输入电压幅值。有些运放可达到正、负电源电压值，称为RRI（Rail-to-Rail Input）输入特性，即

$$V_{\text{icmax}} = V_+, -V_{\text{icmax}} = V_-。$$

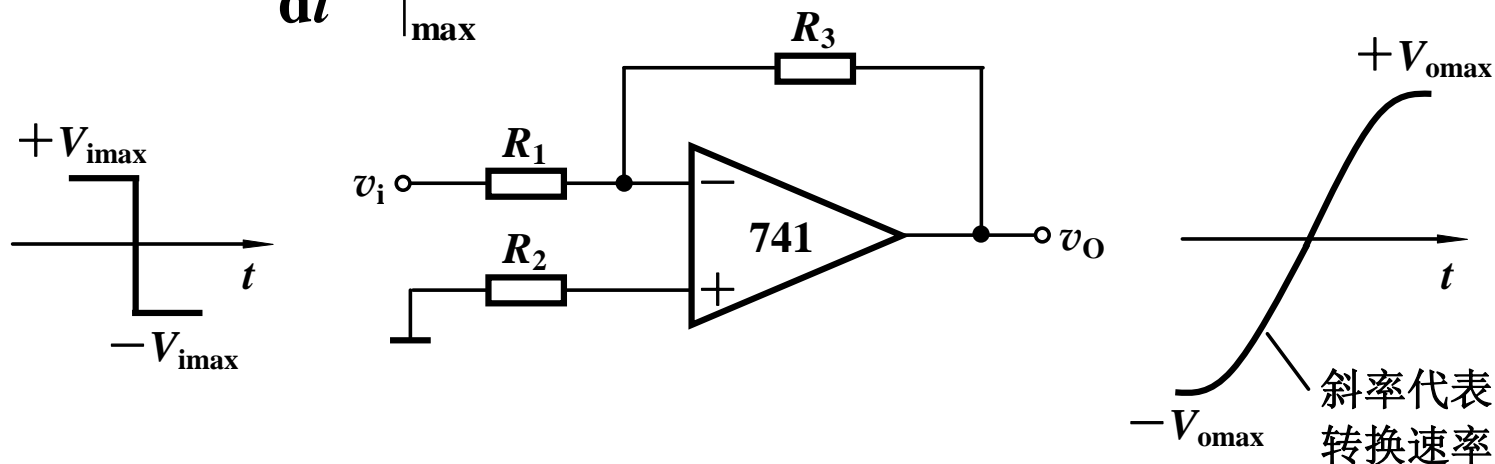
大信号动态特性

1. 转换速率 S_R (Slew Rate)

也称为“压摆率”，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
$$S_R = \left. \frac{dv_o(t)}{dt} \right|_{\max}$$

S_R 通常取绝对值



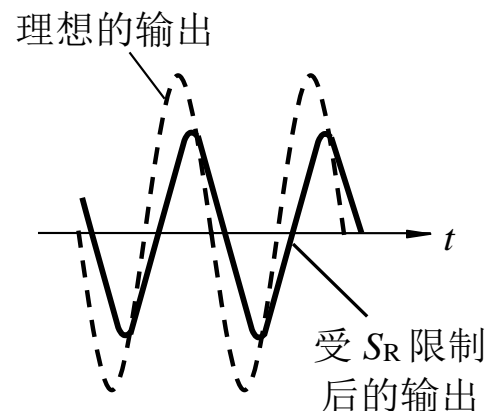
若信号为 $v_i = V_{im} \sin 2\pi f t$ ，则运放的 S_R 必须满足 $S_R \geq 2\pi f_{\max} V_{om}$

大信号动态特性

2. 全功率带宽 BW_P

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 $1V/\mu s$ 以下，741的 $S_R = 0.5V/\mu s$

高速运放要求 $S_R > 30V/\mu s$ 以上。

目前超高速的运放如AD9610的 $S_R > 3500V/\mu s$ 。

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

$$K_{SVR} = \frac{\Delta V_{IO}}{\Delta(V_{CC} + V_{EE})}$$

2. 静态功耗 P_V

当输入信号为零时，运放消耗的总功率

$$P_V = V_{CC}I_{CO} + V_{EE}I_{EO}$$

极限参数

1. 电源电压范围

2. 最大耗散功耗 P_{CO}

3. 最大输出电流 I_{Omax}

另外还有噪声特性等

7.5 运放主要参数和相关应用问题

7.5.1 主要参数

- 输入直流误差特性（输入失调特性）
- 差模特性
- 共模特性
- 大信号动态特性
- 电源特性

7.5.2 相关应用问题

- 集成运放的选用
- 失调电压 V_{IO} 、失调电流 I_{IO} 和偏置电流 I_{IB} 带来的误差
- 有限带宽对高增益带宽积放大电路设计的影响
- 轨到轨（rail-to-rail）输入/输出运放的优势
- 运放使用中输入端的直流通路
- 运放在单电源下工作

7.5.2 运放实际应用问题

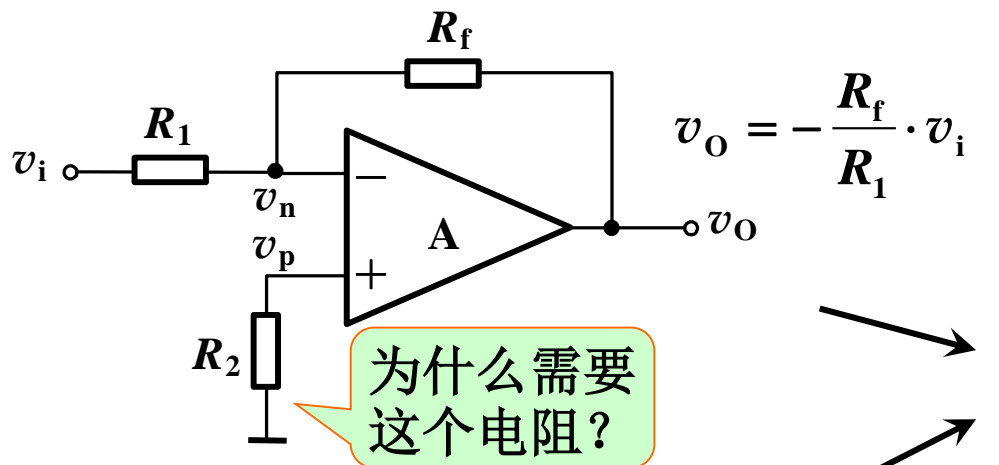
1. 集成运放的选用

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，能做到技术性与经济性的统一。

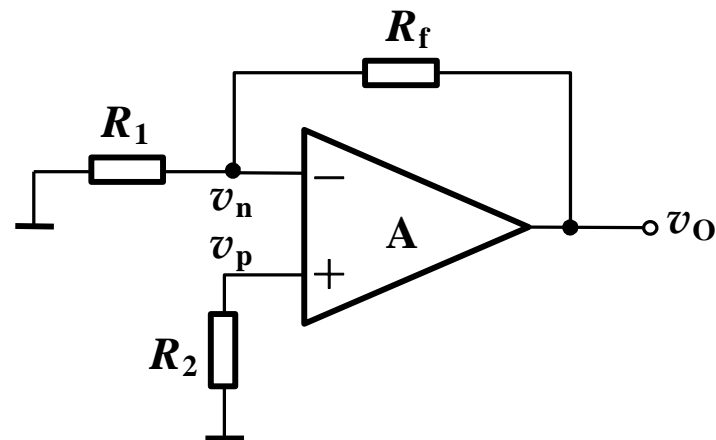
虽然专用型运放某项技术参数很突出，但其他参数则难以兼顾，例如低噪声运放的带宽往往设计得较窄，而高速型与高精度常常有矛盾，如此等等。

7.5.2 运放实际应用问题

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

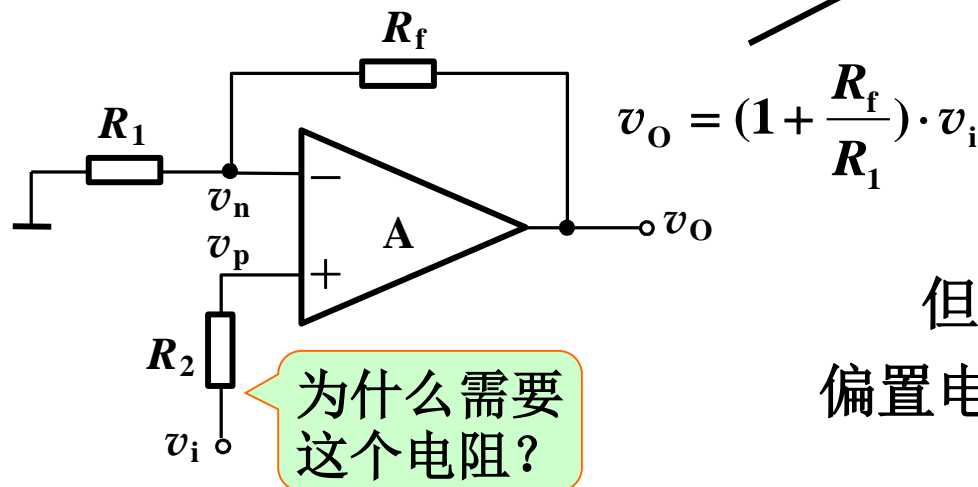


输入信号为零时



应有 $v_O = 0$

但由于失调电压、失调电流、偏置电流的存在使输出不为0。

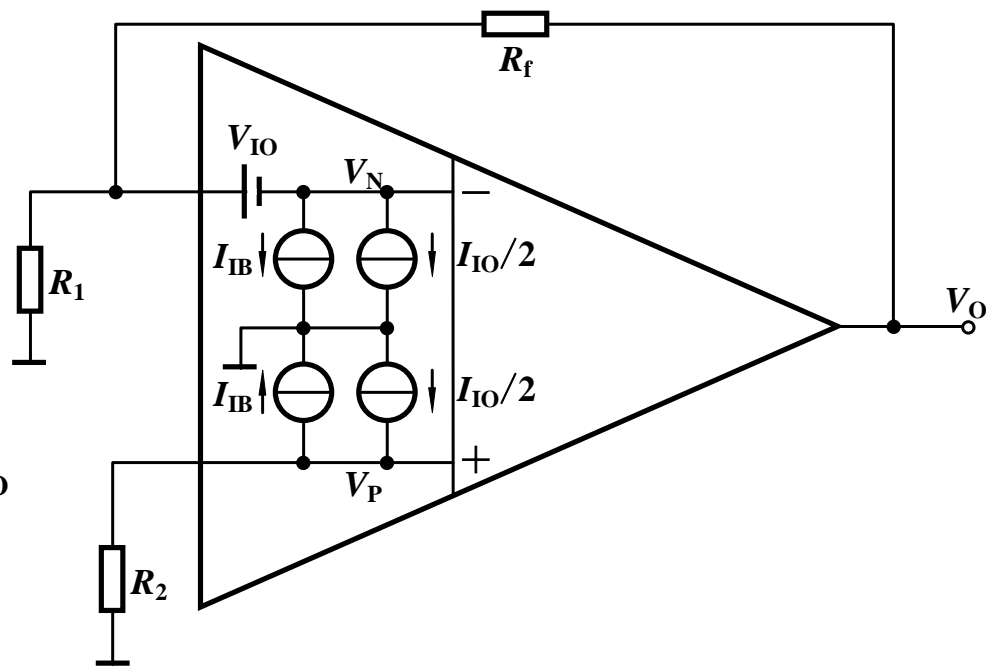


7.5.2 运放实际应用问题

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

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

7.5.2 运放实际应用问题

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

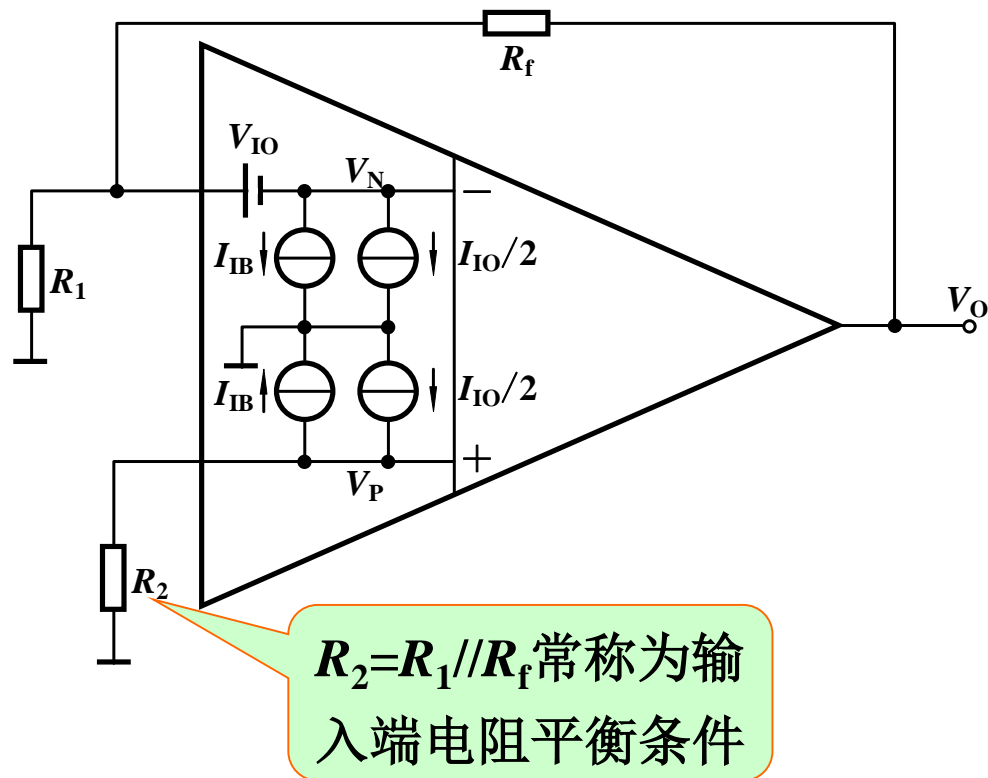
$$V_O = (1 + R_f / R_1)[V_{IO} + I_{IB}(R_1 // R_f - R_2) + \frac{1}{2} I_{IO}(R_1 // R_f + R_2)]$$

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

$$\begin{aligned} V_O &= (1 + R_f / R_1)(V_{IO} + I_{IO} R_2) \\ &= (1 + R_f / R_1)V_{IO} + R_f I_{IO} \end{aligned}$$

V_{IO} 和 I_{IO} 引起的误差仍存在。

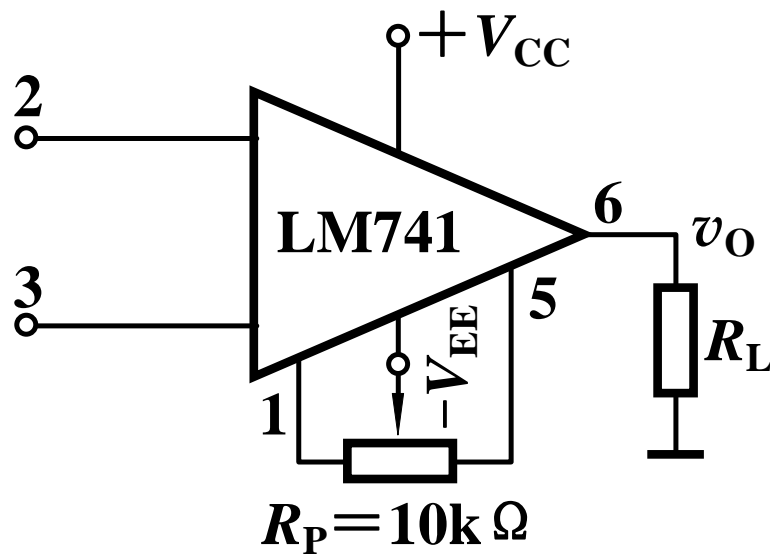
$(1 + R_f / R_1)$ 和 R_f 越大， V_{IO} 和 I_{IO} 引起的输出误差电压也越大。



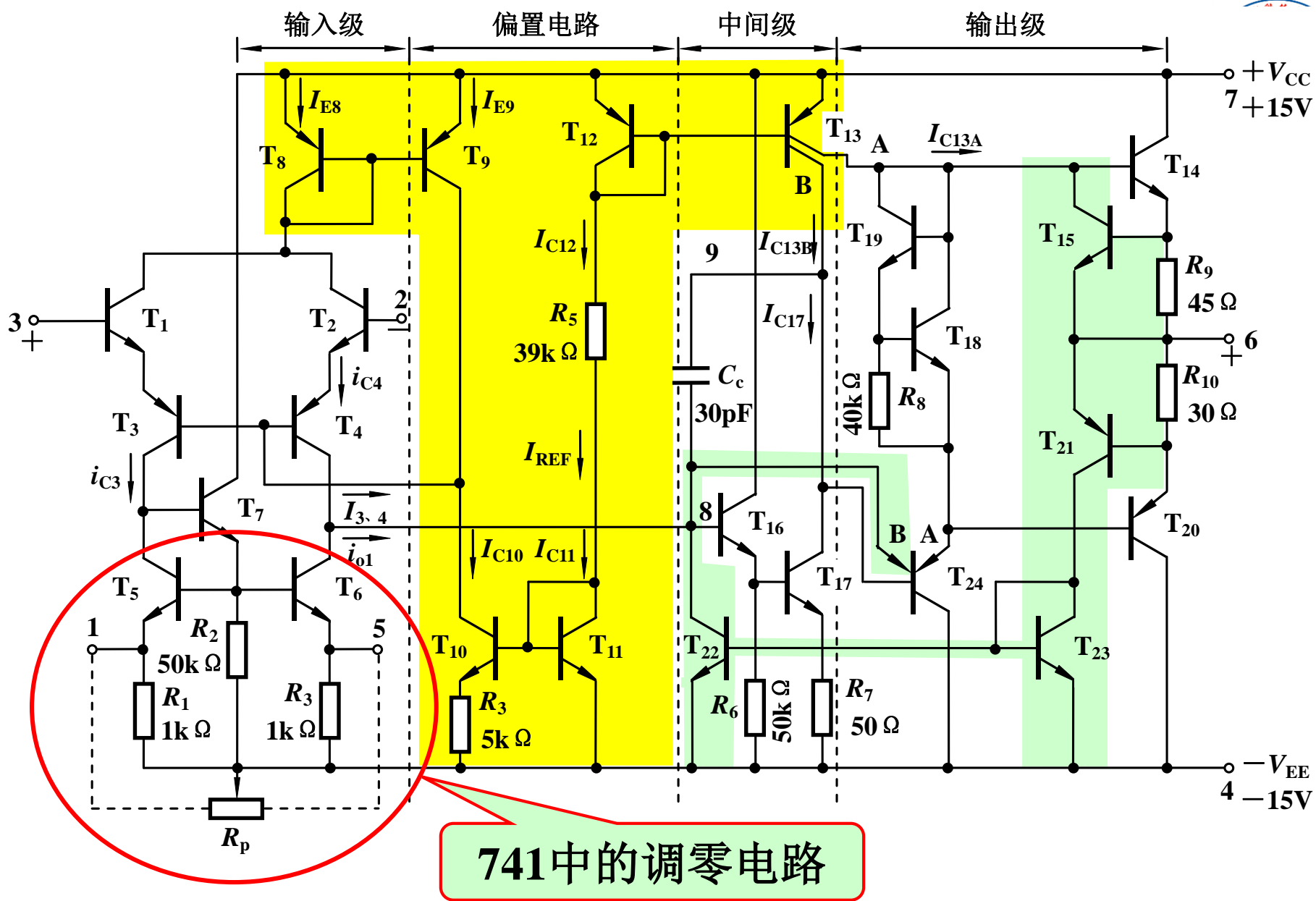
7.5.2 运放实际应用问题

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

调零补偿



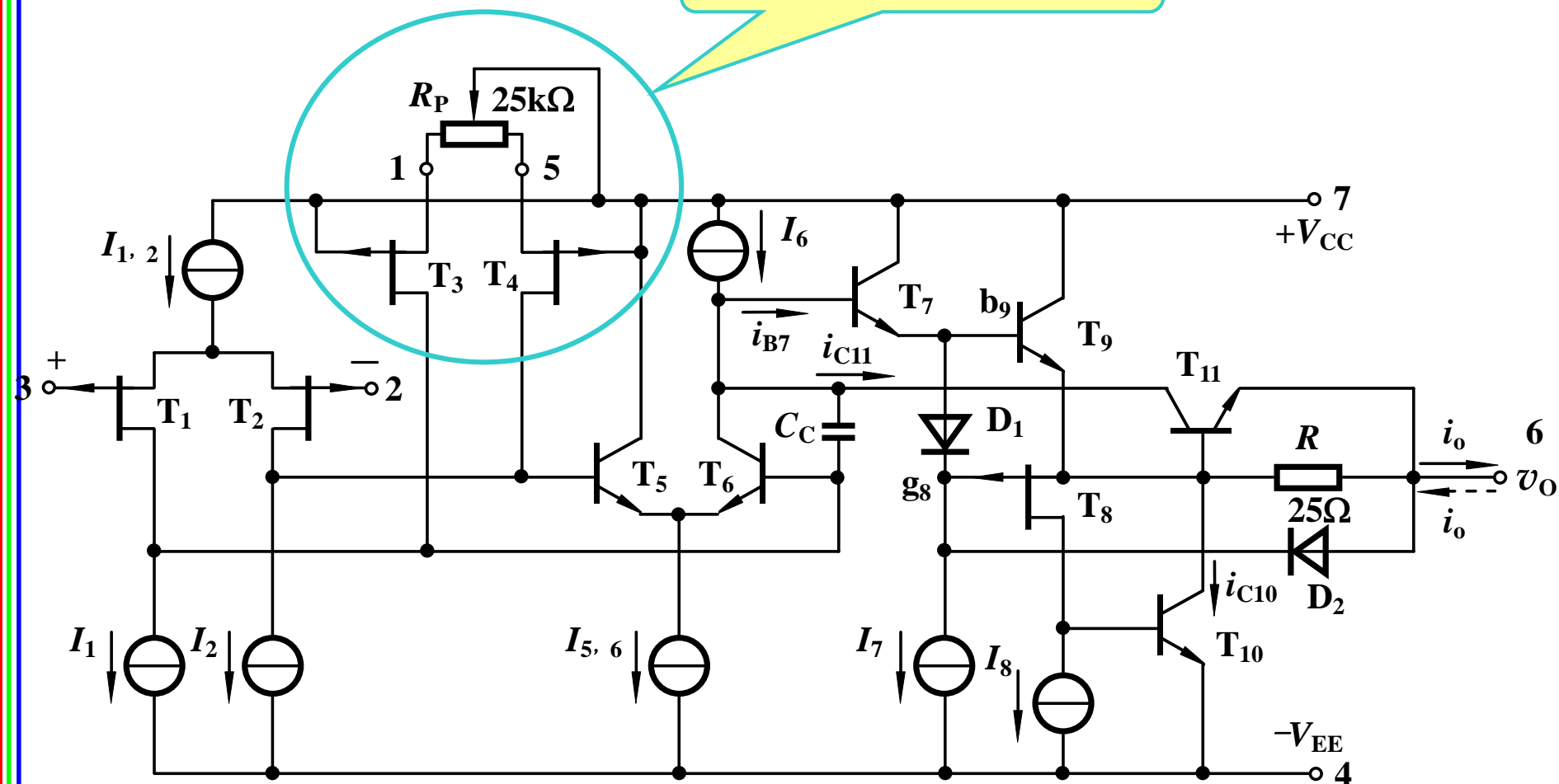
调零电路



7.5.2 运放实际应用问题

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

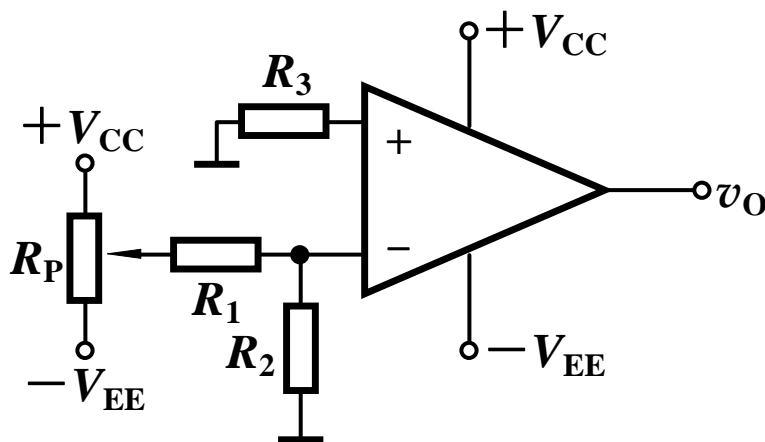
356中的调零电路



7.5.2 运放实际应用问题

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

调零补偿



反相端加入补偿电路

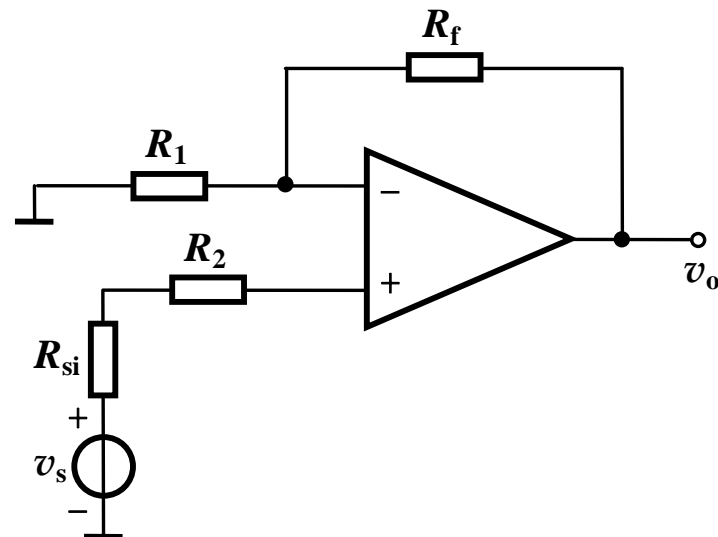
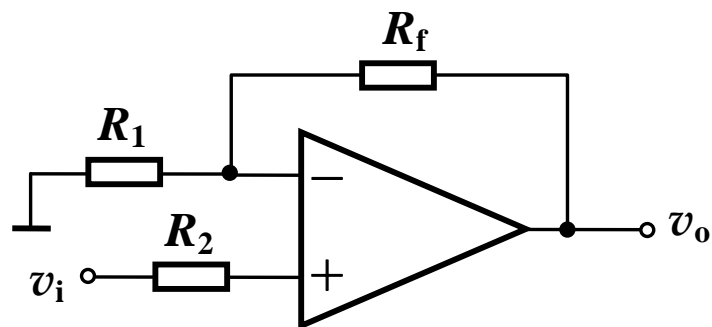
高精度运放有较小的失调电压、失调电流和偏置电流

因为有大量的高精度运放供选用，所以实际上现在的运放几乎不再提供调零端了。

7.5.2 运放实际应用问题

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

接入电阻 R_2 有何作用？



如果 $I_{IB}(R_1//R_f)$ 在输出误差中所占比例无足轻重，就无需添加 R_2 ，否则反而会引入更多的噪声。

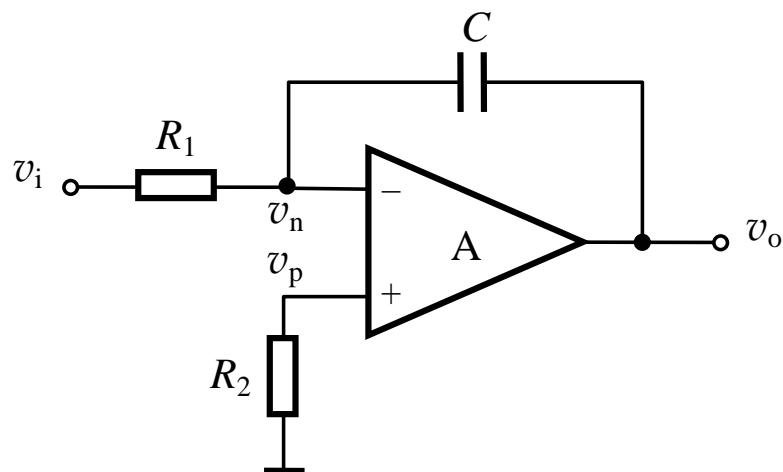
R_2 如何取值？

7.5.2 运放实际应用问题

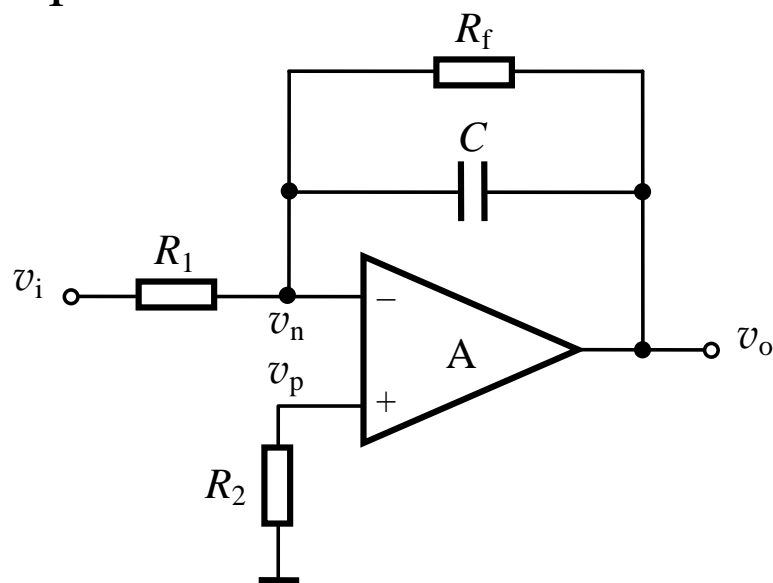
2. 失调电压 V_{IO} 、失调电流 I_{IO} 和偏置电流 I_{IB} 带来的误差

R_f 换成电容 C ，则

$$v_o(t) = [V_{IO}(t) + I_{IO}(t)R_2] + \frac{1}{R_1C} \left[\int V_{IO}(t)dt + \int I_{IO}(t)R_2dt \right]$$



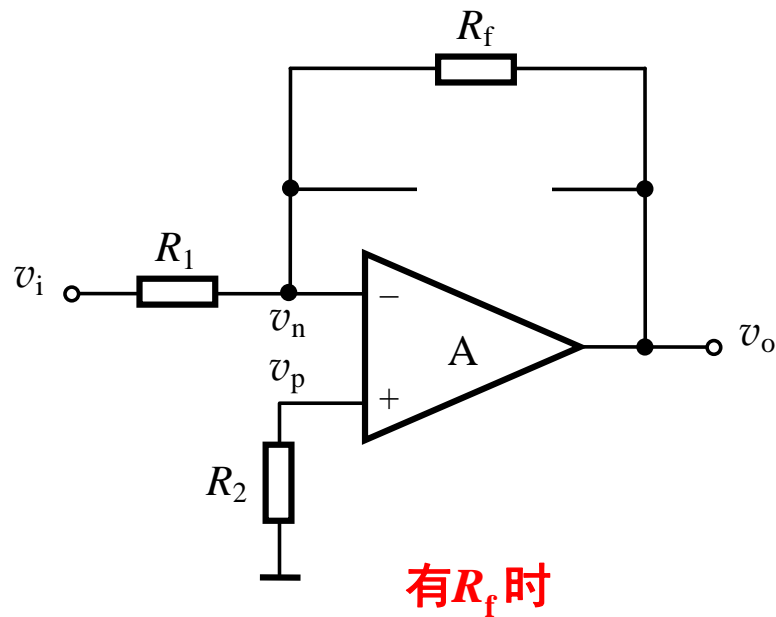
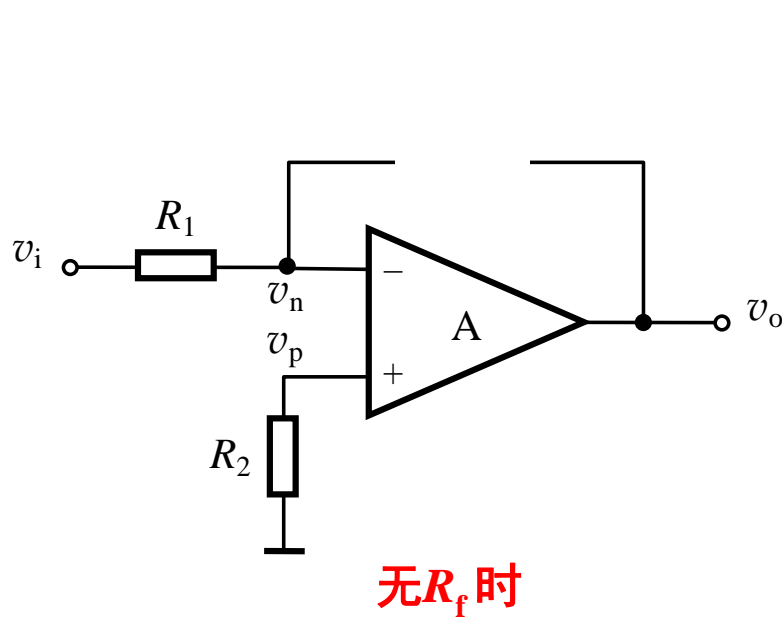
时间越长，误差越大，且易使输出进入饱和状态。



实际常用的积分电路

7.5.2 运放实际应用问题

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



V_{IO} 和 I_{IO} 对电容充电完成后等效于开环状态，运放无法工作在线性区。

V_{IO} 和 I_{IO} 对电容充电完成后等效于反相放大电路，可以使运放工作在线性区。

7.5.2 运放实际应用问题

3. 有限带宽对高增益-带宽积放大电路设计的影响

如果用741单级将信号放大10000倍（80dB），放大电路的带宽是多少？

741的单位增益带宽

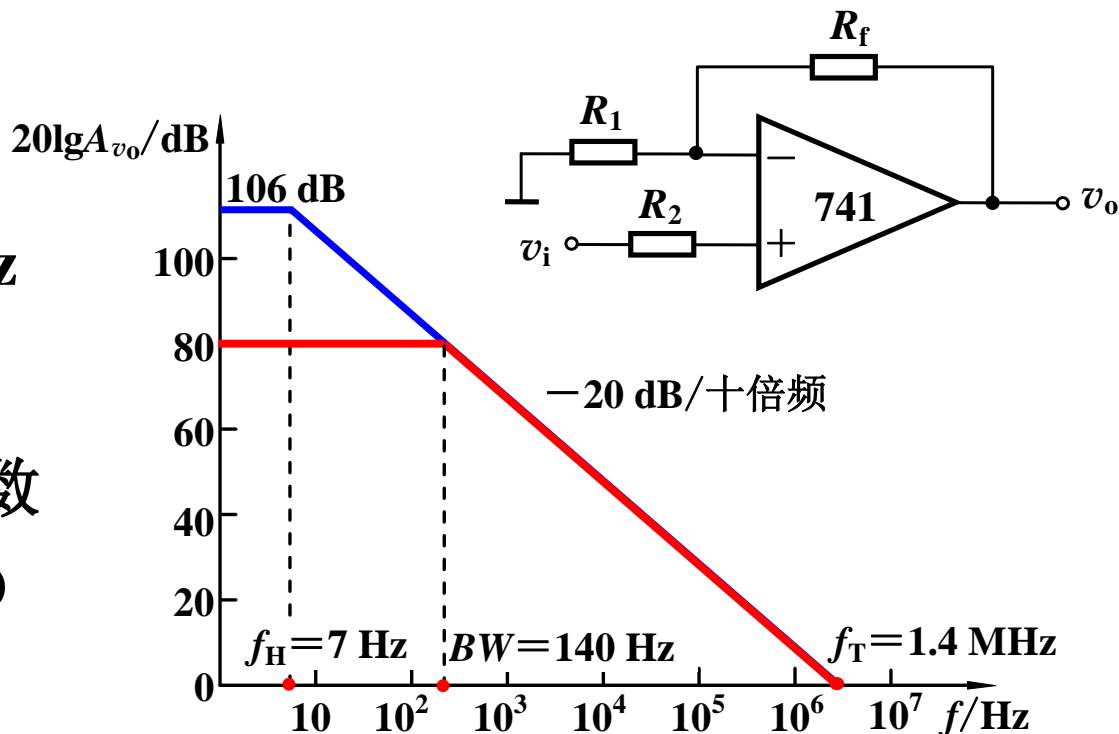
$$BW_G(f_T) = 1.4 \text{ MHz}$$

80dB时

由于增益带宽积为常数
（-20dB/十倍频斜率）

可求得此时带宽

$$\begin{aligned} BW &= BW_G / 10000 \\ &= 1.4 \text{ MHz} / 10000 = 140 \text{ Hz} \end{aligned}$$



741型运放 A_{v_o} 的频率响应

7.5.2 运放实际应用问题

3. 有限带宽对高增益-带宽积放大电路设计的影响

如果用741两级将信号放大10000倍（80dB），放大电路的带宽是多少？

可求得此时带宽

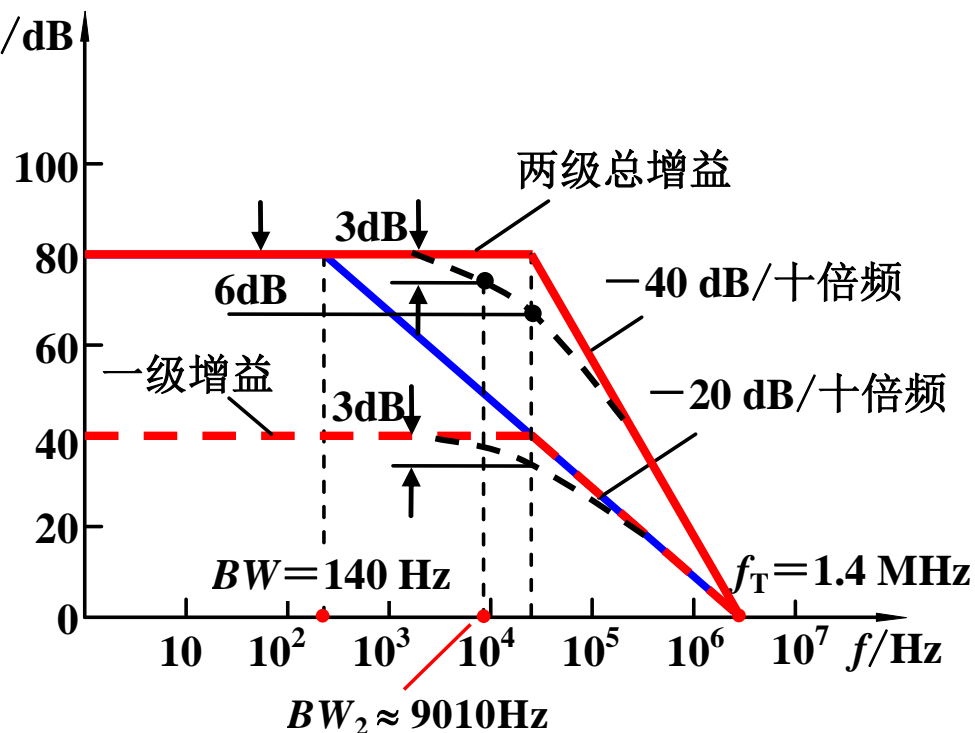
$$BW_2 = (2^{\frac{1}{2}} - 1)^{\frac{1}{2}} f_T / A^{\frac{1}{2}}$$

$$\approx 9010 \text{ Hz}$$

约是单级时的64倍。

实际上两级对带宽的改善最明显，随着随级数的增加，带宽的增加会逐渐减少。

如果总增益A并不高时，这种方法提高带宽的效果并不明显。

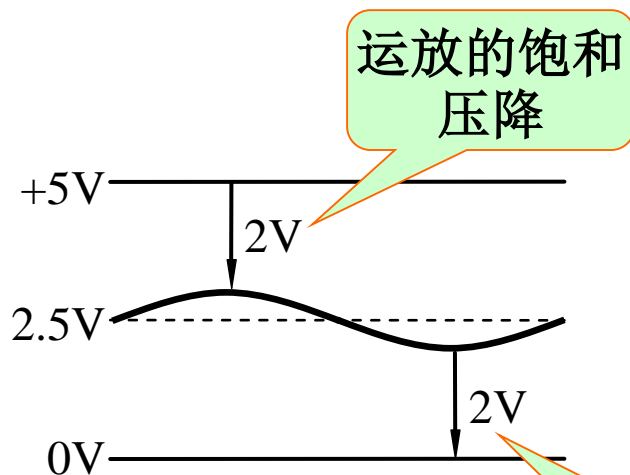


提高带宽的根本办法是增益带宽积更大的运算放大器。

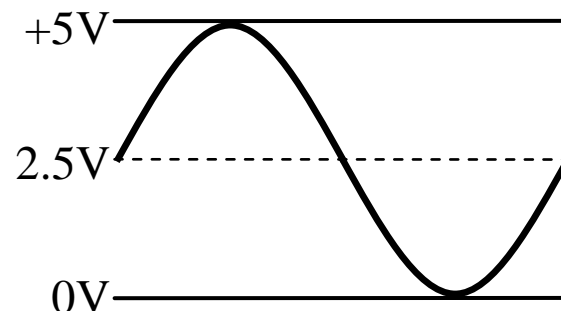
7.5.2 运放实际应用问题

4. 轨到轨 (rail-to-rail) 输入/输出运放的优势

低电源电压下两种运放的电压摆幅



非轨到轨运放



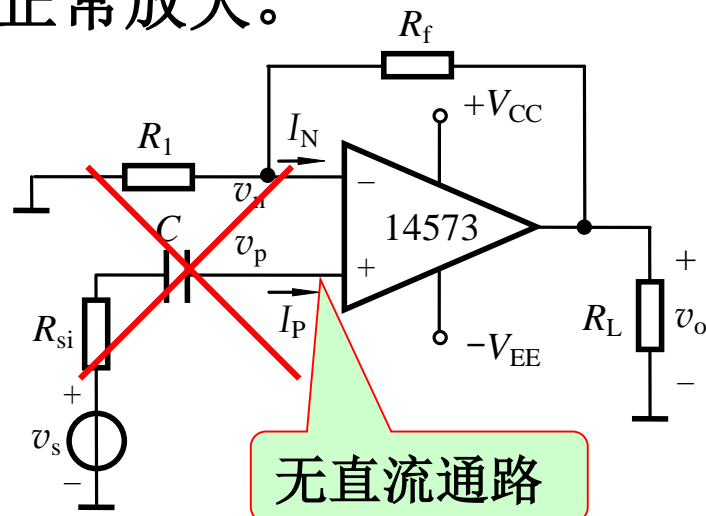
轨到轨运放

运放的饱和
压降

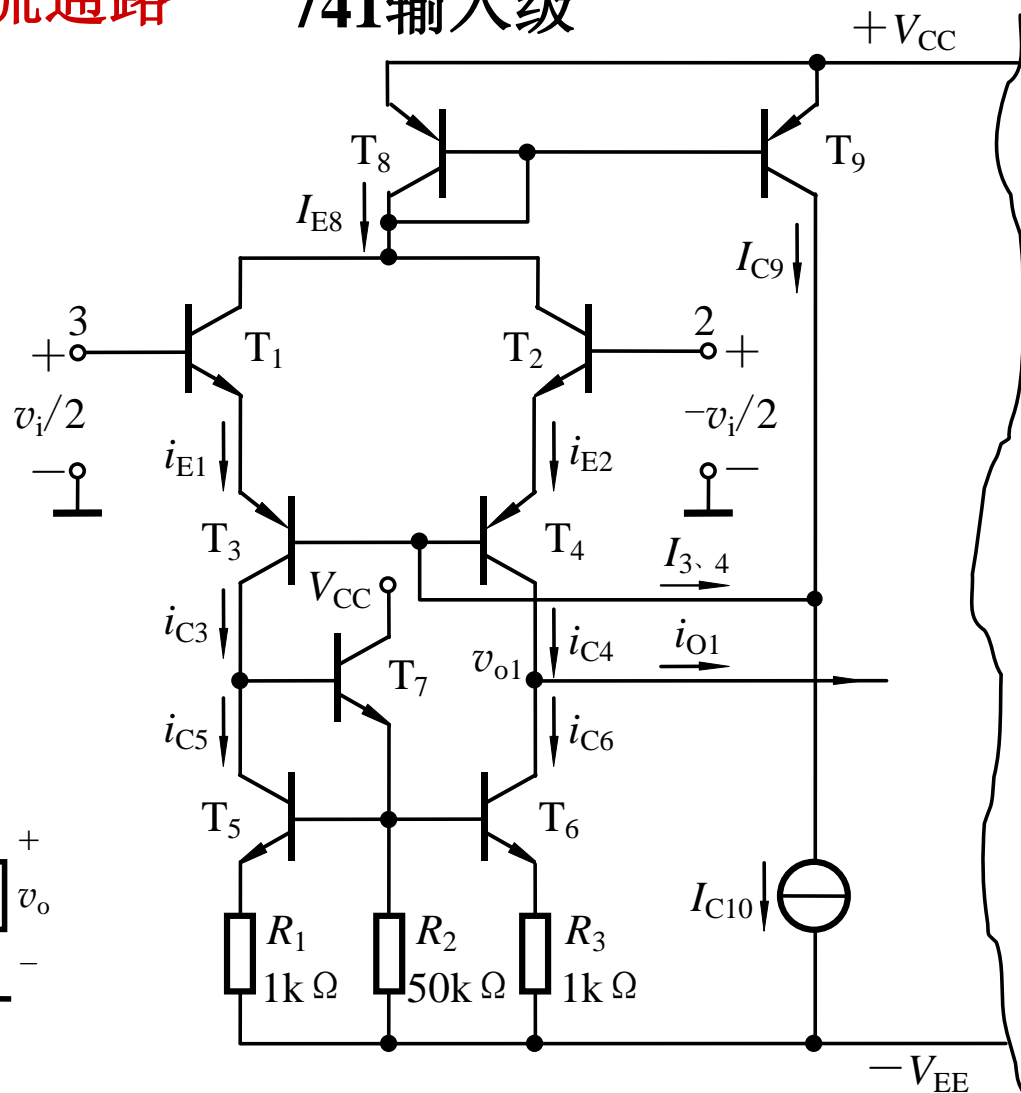
7.5.2 运放实际应用问题

5. 运放使用中输入端的直流通路

若运放741的输入端2号或3号引脚没有直流通路，运放内部电路将无合适的静态工作点，有交流信号输入时也不能正常放大。

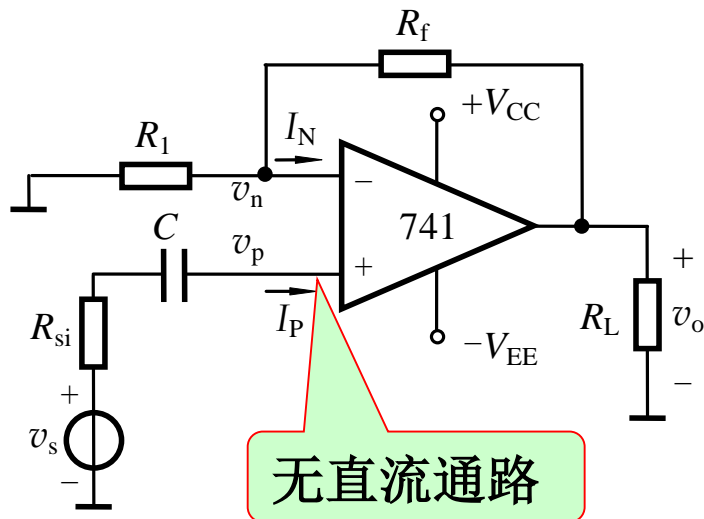


741输入级

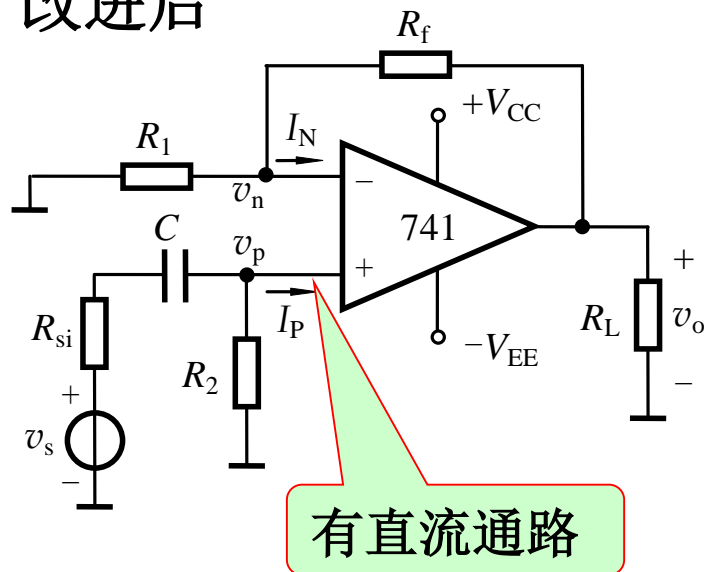


7.5.2 运放实际应用问题

5. 运放使用中输入端的直流通路



改进后

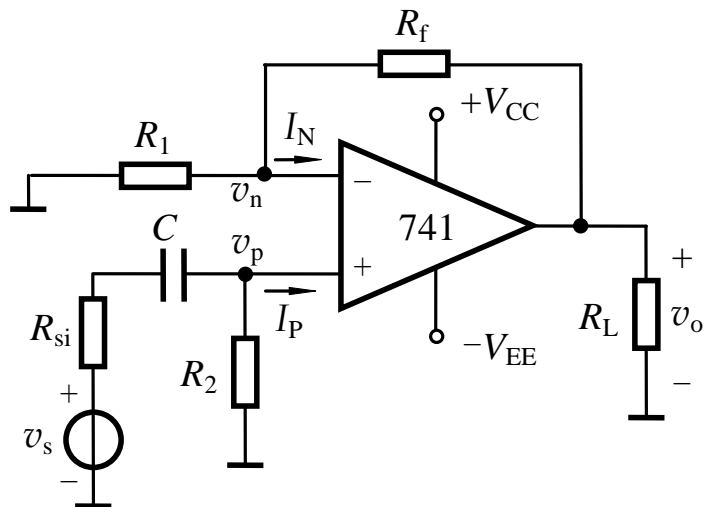


如何考虑输入端电阻平衡条件？

7.5.2 运放实际应用问题

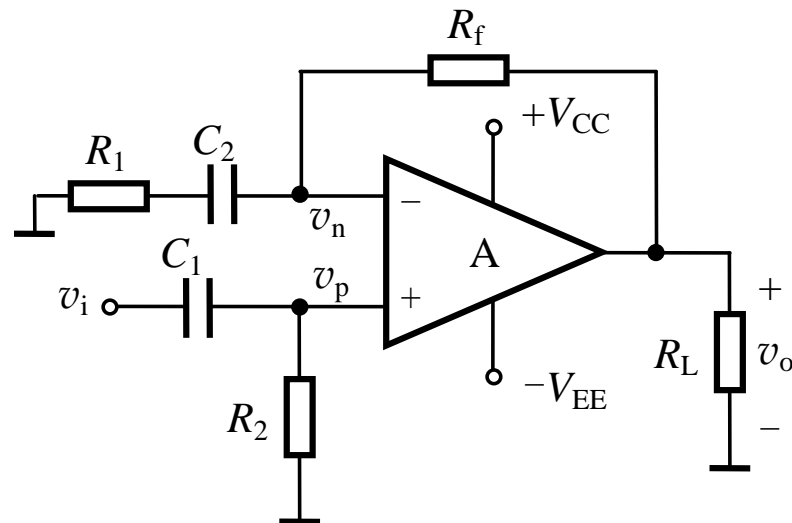
5. 运放使用中输入端的直流通路

交流同相放大电路



交流、直流电压（对 v_p ）
增益均为

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



交流电压增益为

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

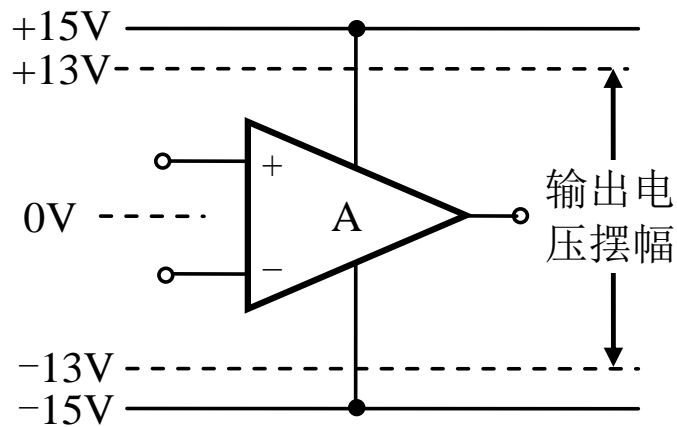
直流电压（对 v_p ）增益为

$$A = 1$$

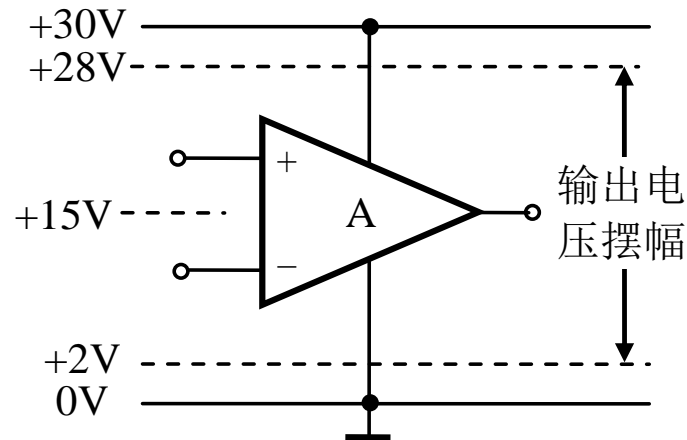
7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

关键是将输出端的静态电压设置为电源电压的一半。



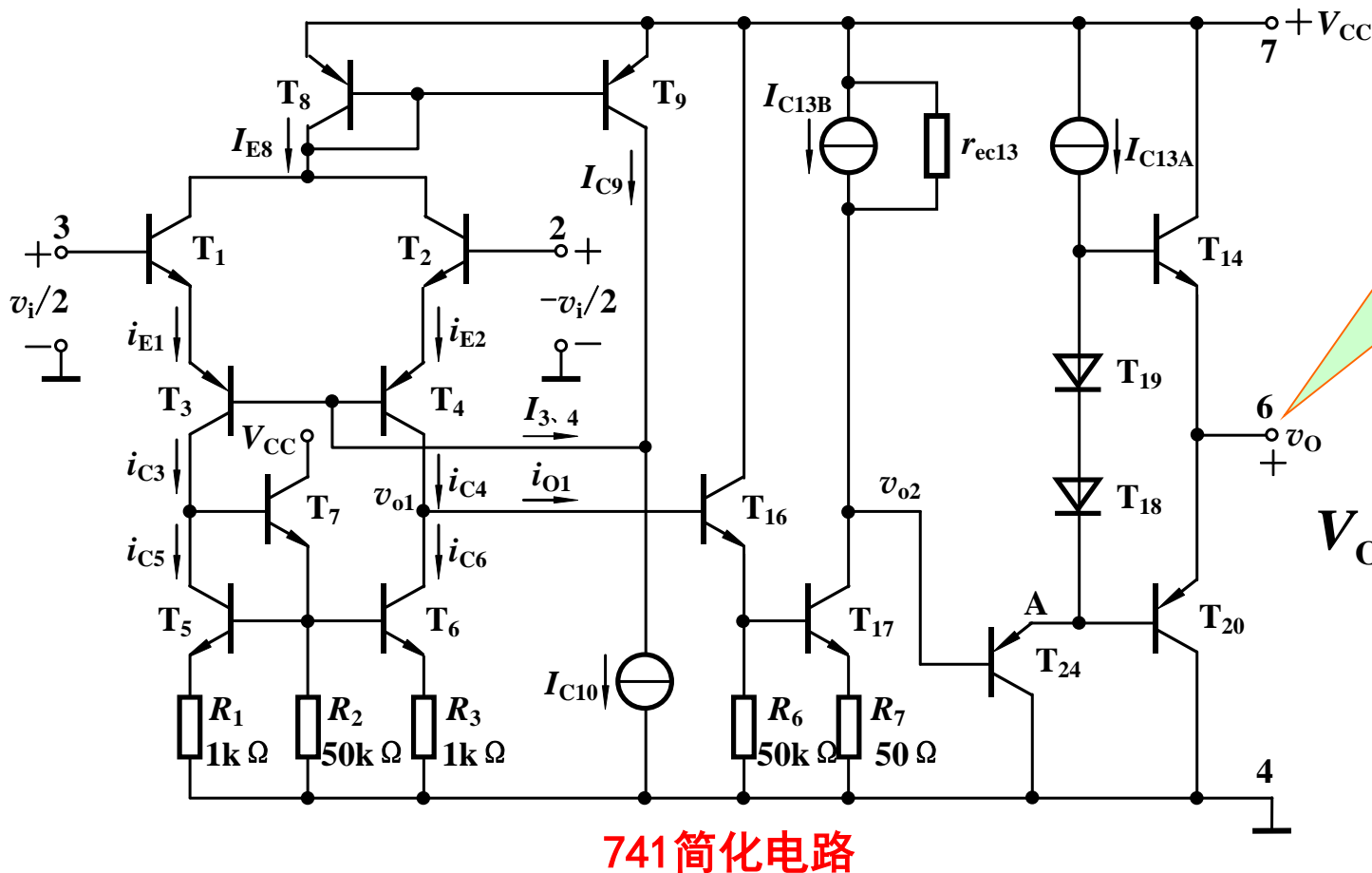
对称的双电源工作



单电源工作

7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作



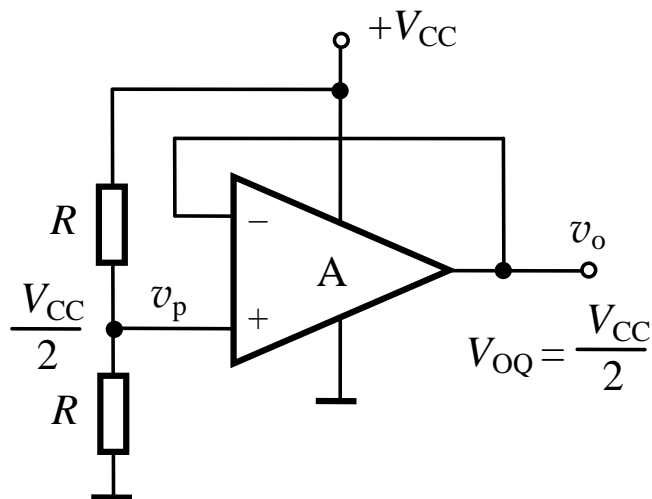
能否将输出端的静态电压设置在 $V_{CC}/2$ 处?

$$V_{OQ} = \frac{1}{2} \cdot V_{CC}$$

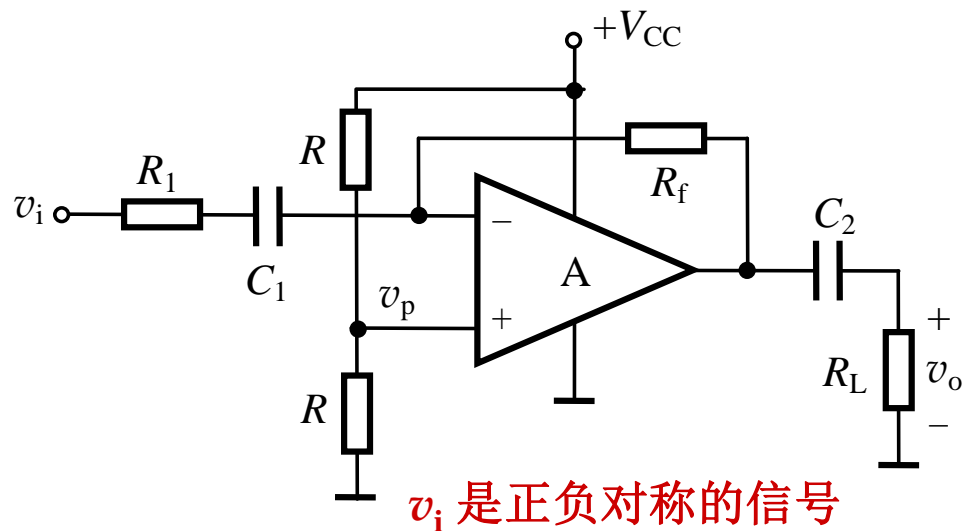
7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

设置输出静态电压



阻容耦合反相放大电路

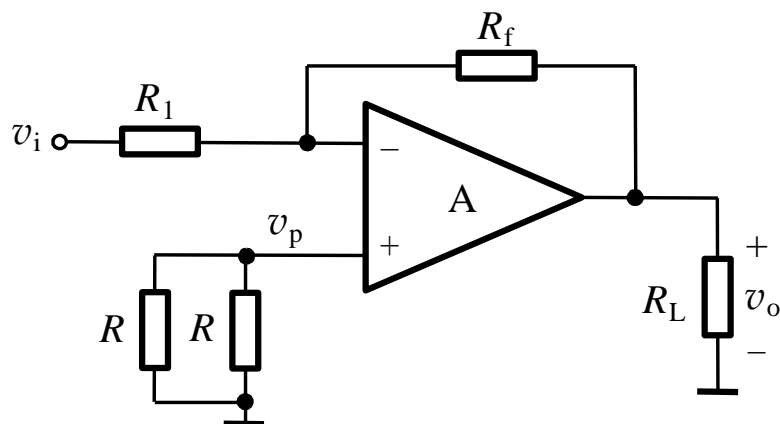


接入 C_1 和 C_2 避免信号源和负载影响静态工作点

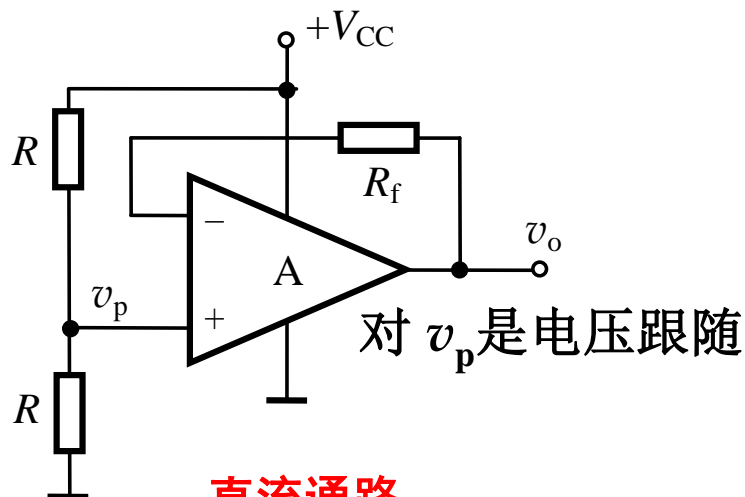
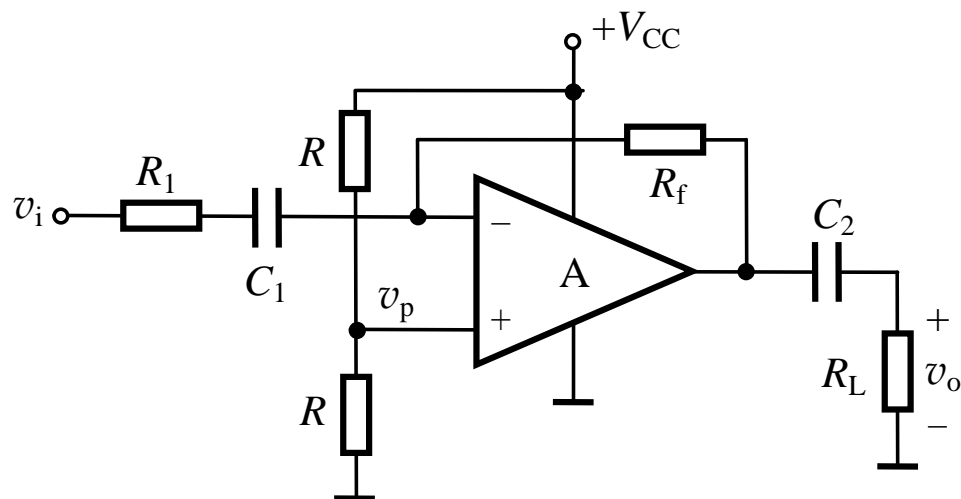
7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

阻容耦合反相放大电路



交流通路



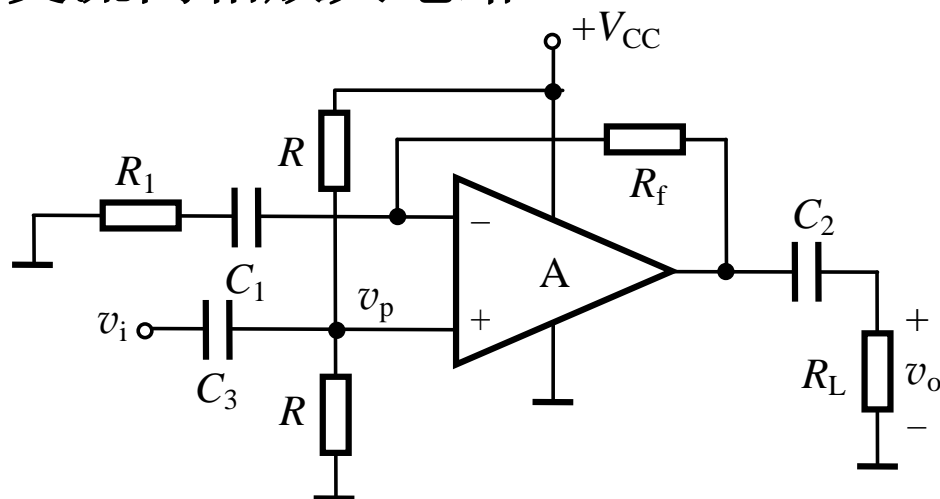
对 v_p 是电压跟随

直流通路

7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

交流同相放大电路

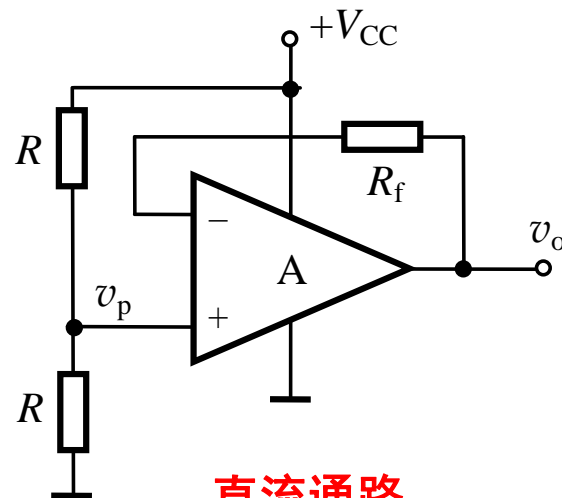


v_i 是正负对称的信号

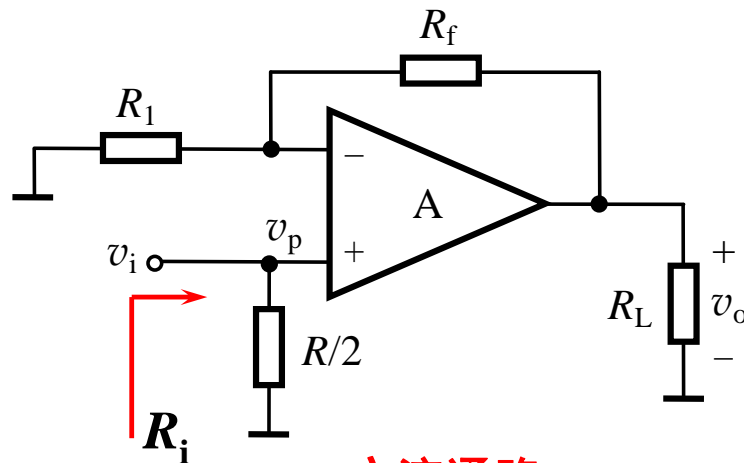
交流电压增益为

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

输入电阻有限



直流通路



交流通路

7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

直接耦合反相放大电路

电阻应满足关系:

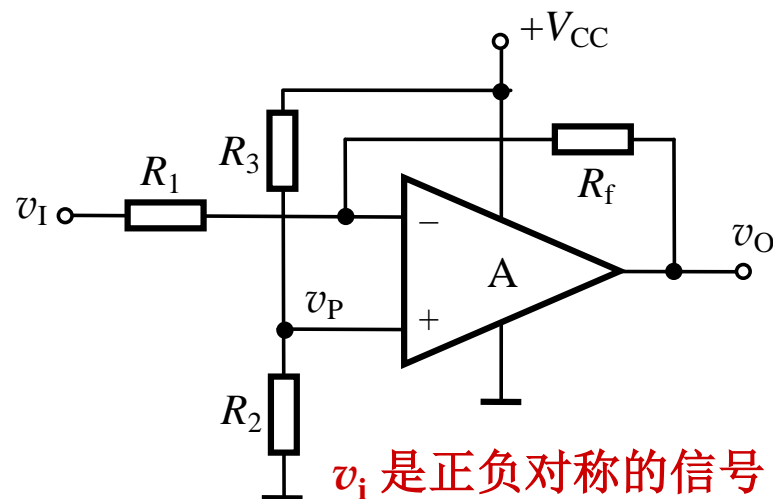
$$\frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

此时输出电压

$$v_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{1}{2} \frac{R_f}{R_1 + R_f} V_{CC}\right) - \frac{R_f}{R_1} v_I = \frac{1}{2} V_{CC} - \frac{R_f}{R_1} v_I$$

v_O 与 v_I 的变化关系

$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_f}{R_1} \quad \text{反相放大}$$



直流偏移

7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

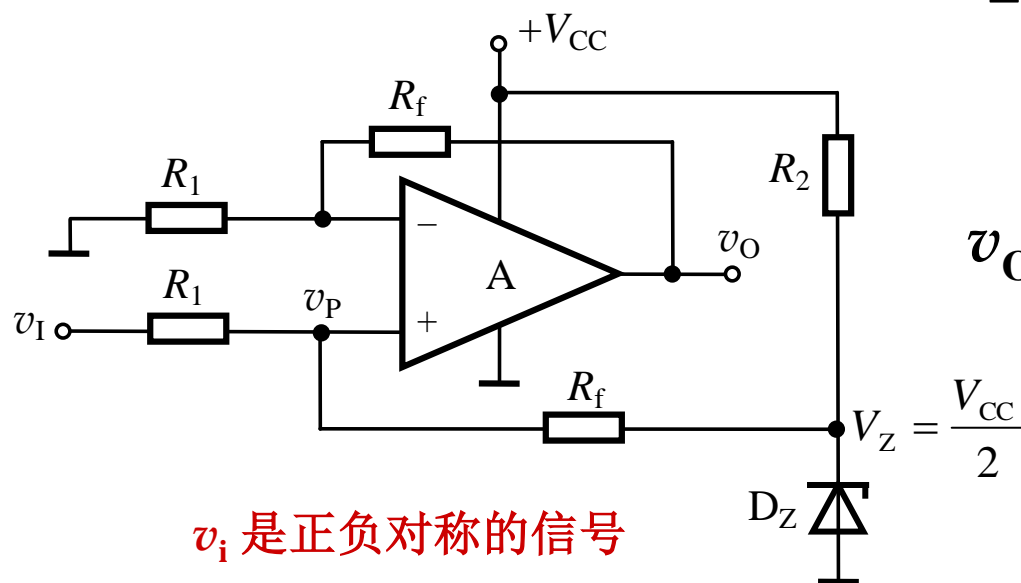
直接耦合同相放大电路

输出电压

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_f}{R_1 + R_f} v_i + \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_Z)$$

$$= \frac{R_f}{R_1} v_i + V_Z = \frac{R_f}{R_1} v_i + \frac{V_{CC}}{2}$$

直流偏移



v_o 与 v_i 的变化关系

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

同相放大

7.5.2 运放实际应用问题

6. 运放在单电源下工作

要点:

- 须将输出静态电压值设置为电源电压的一半
- 信号源和负载的接入不能影响已设置好的静态值
- 同样要保证两输入端有直流通路
- 对于交流放大电路，只要能保证运放工作在线性区，就不需要严格遵守输入端电阻平衡条件。

实际应用时还需考虑信号特点，如，信号是否含有直流，信号的电压（电流）范围等。针对信号的不同特点选用不同的电路方案。

Questions and Answers