

第6章 集成运算放大器

本章内容

6.1 基本概念和内容要点概述

6.2 差分放大器

6.3 恒流源

6.4 LM741内部电路的分析

6.5 集成放大器的使用参数



本章重点和考点：

1. 集成电路的特点。
2. 偏置电路（电流源）的作用、分类及计算。
3. 理想集成运算放大电路（IC）的性能指标。

6.1 基本概念与内容要点概述

集成电路简称 IC (Integrated Circuit)

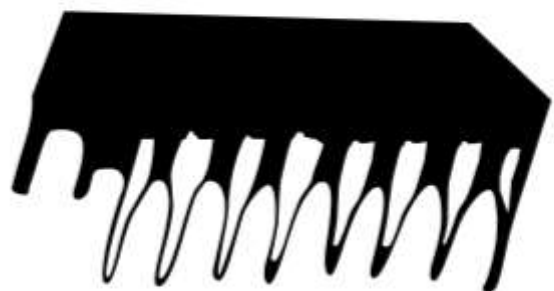
集成电路按其功能分

数字集成电路
模拟集成电路

模拟集成电路类型

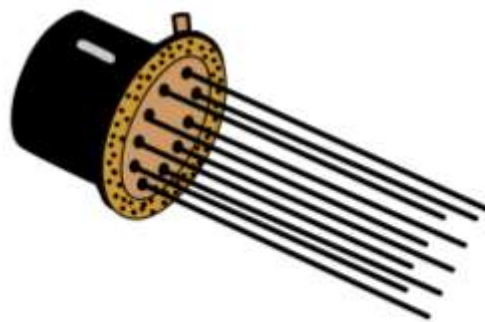
集成运算放大器；集成功率放大器；
集成高频放大器；集成中频放大器；
集成比较器；集成乘法器；集成稳压器；
集成数/模或模/数转换器等。

集成电路的外形



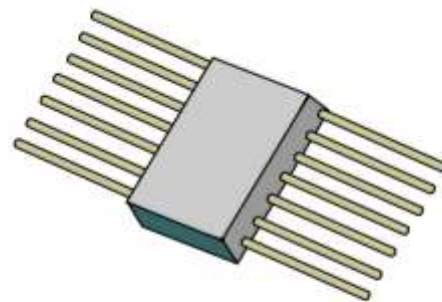
(a)

(a) 双列直插式



(b)

(b) 圆壳式

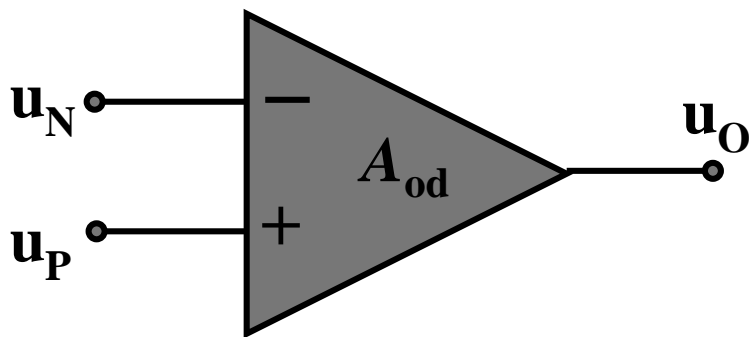


(c)

(c) 扁平式

集成电路的外形

6.1.1 集成运放的符号



集成运放的符号

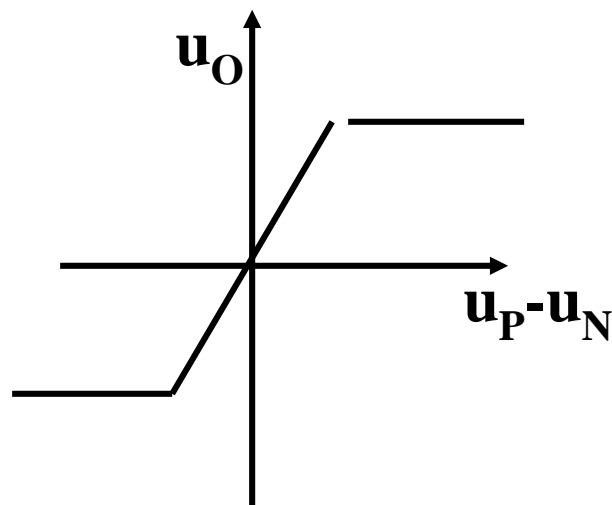
集成运放的两个输入端分别为同相输入端 u_P 和反向输入端 u_N 。

6.1.2 理想集成运放

理想集成运放(简称理想运放)的构成需具备以下几个主要条件。

- (1) 差模开环电压放大倍数 A_{od} 接近无穷大, 即 $A_{od} = u_{O} / (u_{P} - u_{N}) \rightarrow \infty$ 。
- (2) 开环输入电阻 $r_i \rightarrow \infty$ 。
- (3) 开环输出电阻 $r_o \rightarrow 0$ 。
- (4) 共模抑制比 $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 。

集成运放的特性



集成运放的电压传输特性

集成运放的两个输入端分别为同相输入端 u_P 和反向输入端 u_N 。

电压传输特性

$$u_O = f(u_P - u_N)$$

集成运放的工作区域

线性区域:

输出电压与其两个输入端的电压之间存在线性放大关系, 即

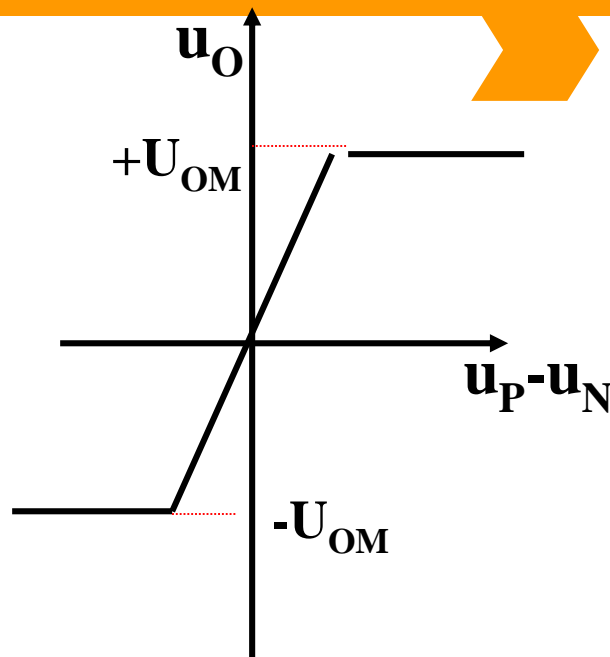
$$u_o = A_{od}(u_P - u_N)$$

A_{od} 为差模开环放大倍数

非线性区域:

输出电压只有两种可能的情况: $+U_{OM}$ 或 $-U_{OM}$

U_{OM} 为输出电压的饱和电压。



6.1.3 集成运放电路的组成及其各部分的作用

实质上是一个具有高放大倍数的多级直接耦合放大电路。

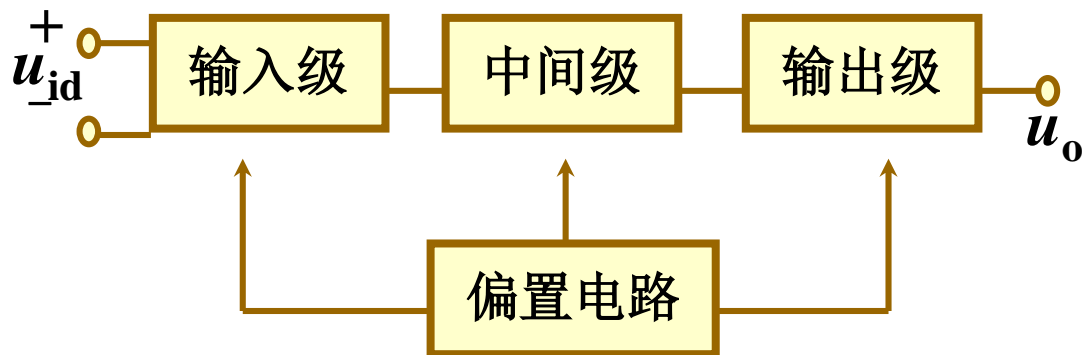


图 4.1.1 集成运算的基本组成

- 一、输入级 差分电路，大大减少温漂。
- 二、中间级 采用有源负载的共发射极电路，增益大。
- 三、输出级 互补对称 电路，带负载能力强
- 四、偏置电路 电流源电路，为各级提供合适的静态工作点。

集成运放的电路结构特点

一. 对称性好，适用于构成差分放大电路。

二. 集成电路中电阻，其阻值范围一般在几十欧到几十千欧之间，如需高阻值电阻时，要在电路上另想办法。

三. 在芯片上制作三极管比较方便，常常用三极管代替电阻(特别是大电阻)。

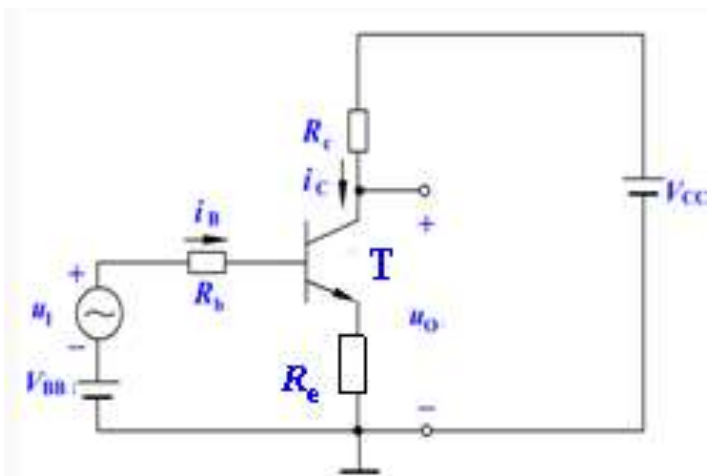
四. 在芯片上制作比较大的电容和电感非常困难，电路通常采用直接耦合电路方式。

五. 集成电路中的 NPN、PNP管的 β 值差别较大，通常 PNP 的 $\beta \leq 10$ 。常采用复合管的形式。

6.2 差分放大电路

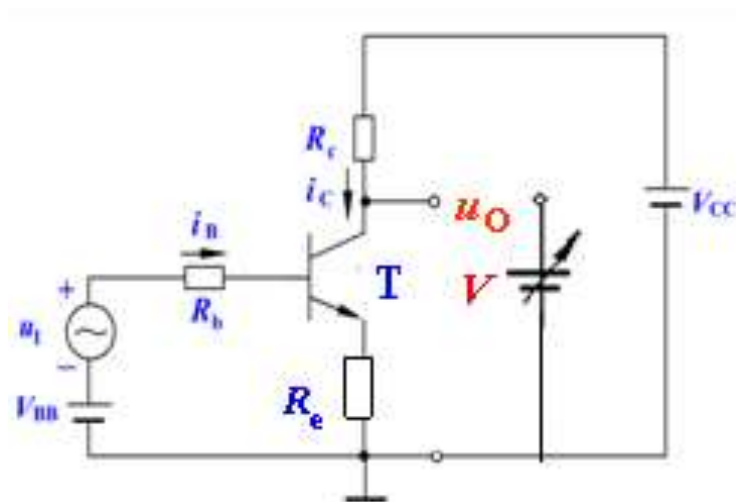
差分放大电路是构成多级直接耦合放大电路的基本单元电路

一、电路的组成



差分放大电路的组成(a)

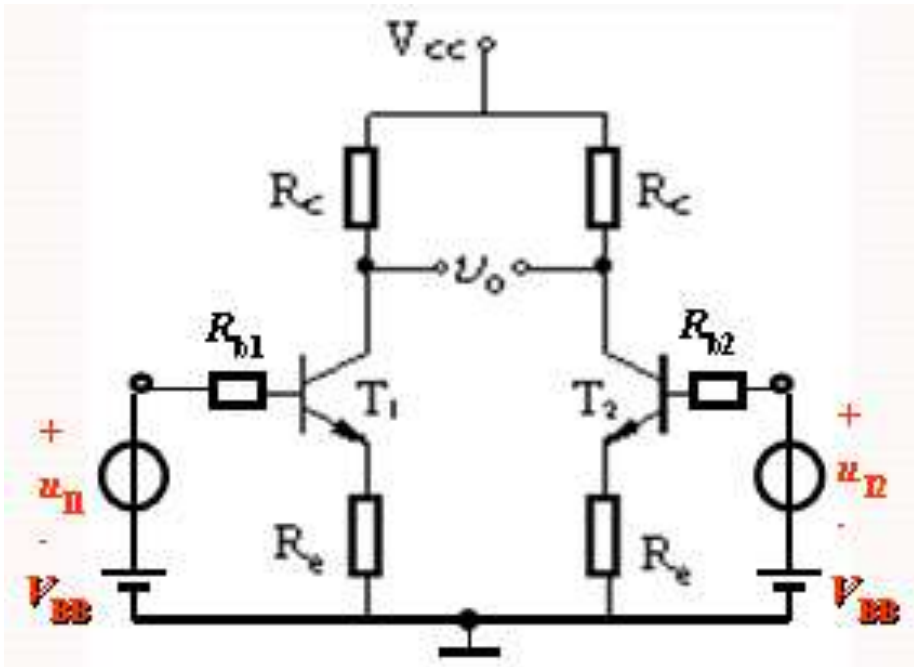
利用射极电阻稳定Q点
但仍存在零点漂移问题



差分放大电路的组成(b)

T的 U_{CQ} 变化时，直流电源V始终与之保持一致。

采用与图（a）所示电路参数完全相同，管子特性也相同的电路



差分放大电路的组成(c)

电路以两只管子集电极电位差为输出，可克服温度漂移。

共模信号

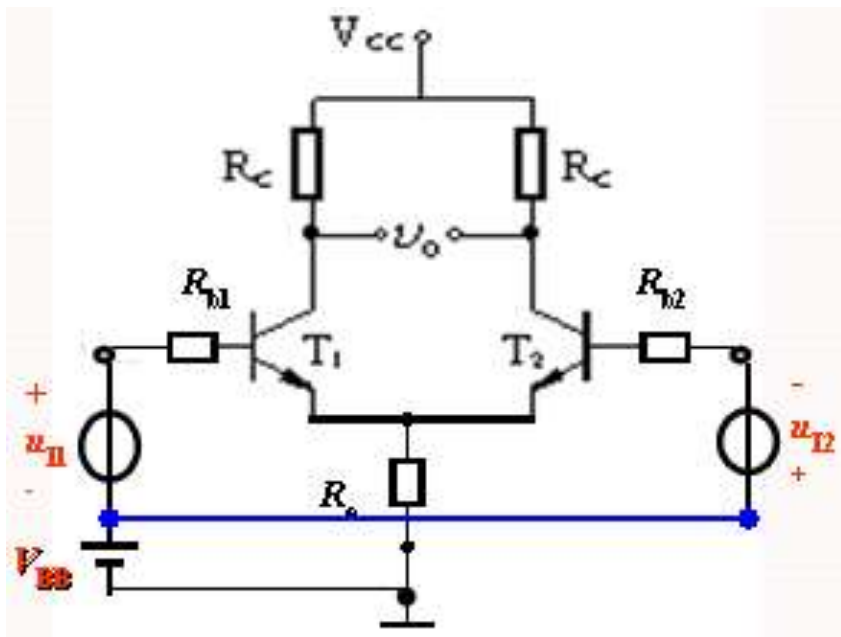
输入信号 u_{I1} 和 u_{I2} 大小相等，极性相同。

差模信号

输入信号 u_{I1} 和 u_{I2} 大小相等，极性相反。

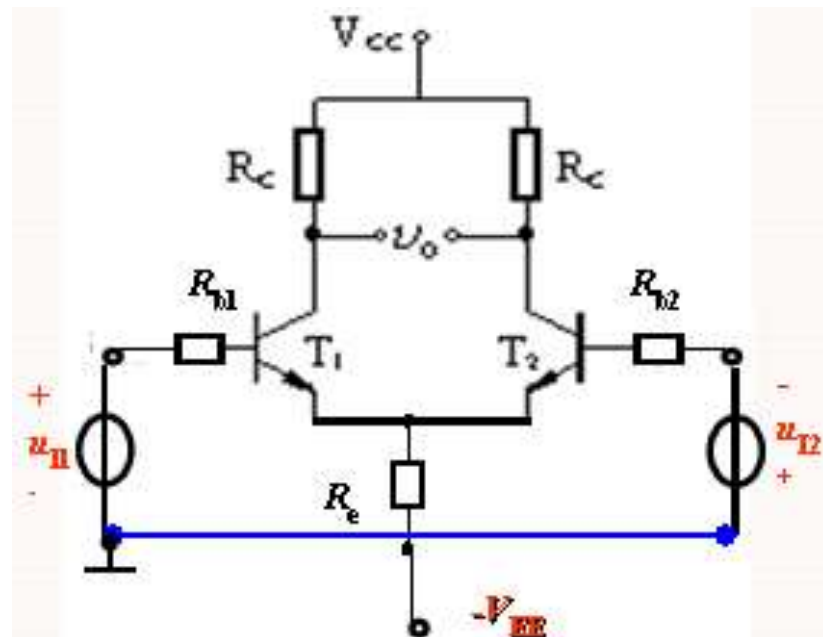
差分放大电路也称为差动放大电路

差分放大电路的改进图



将发射极电阻合二为一、
对差模信号 R_e 相当于短路。

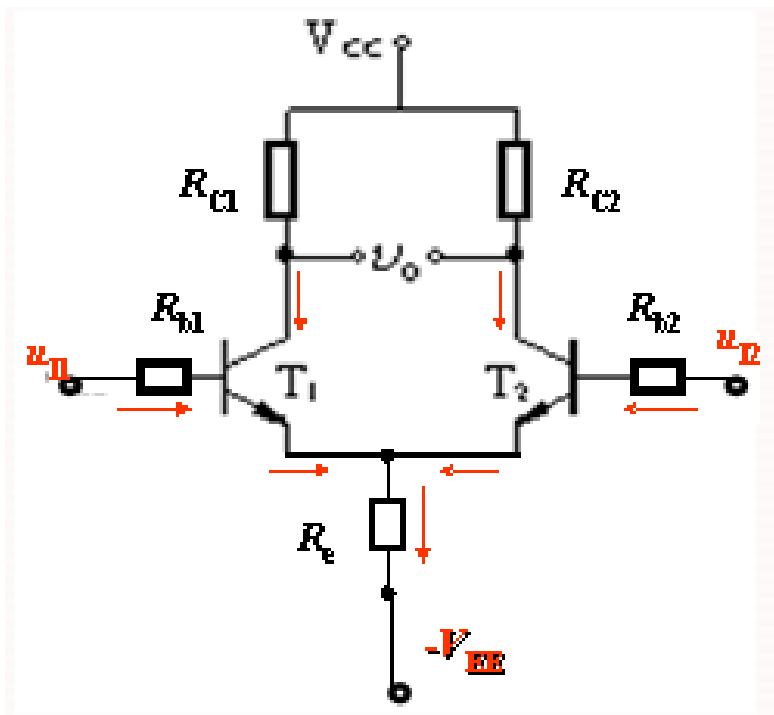
典型差分放大电路



典型差分放大电路

便于调节静态工作点，电
源和信号源能共地

二、典型差分放大电路



典型差分放大电路

1. 静态分析

由于 R_b 较小，其上的电压降可忽略不计。

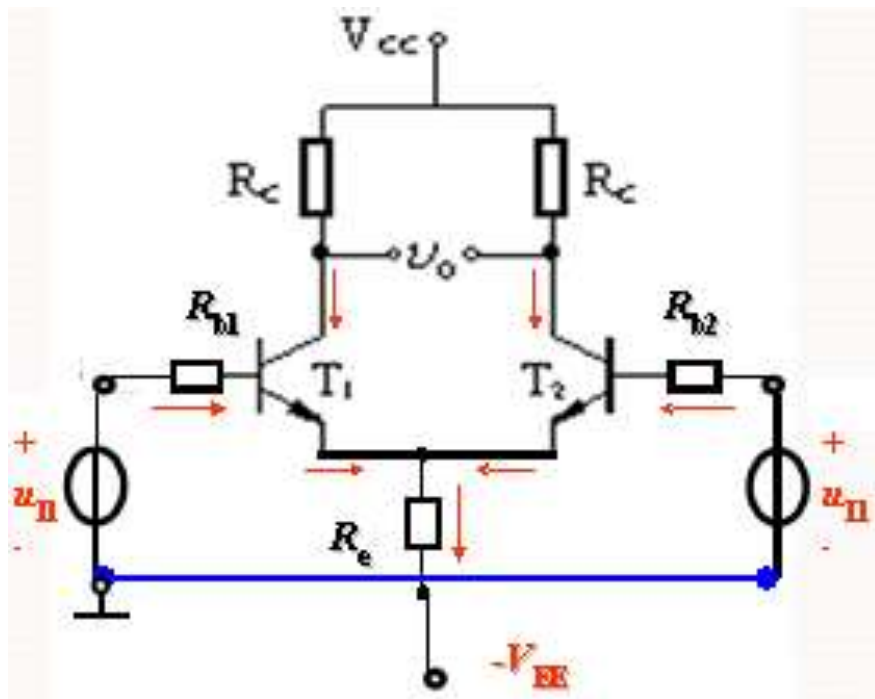
$$I_{E1} = I_{E2} = (U_{EE} - U_{BE}) / 2R_e ;$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{E1} / (1 + \beta)$$

$$U_{CE1} = U_{CE2} \approx U_{CC} + U_{EE} - (R_C + 2R_e) I_{E1}$$

$$U_o = 0;$$

2.对共模信号的抑制作用



差分放大电路输入共模信号

共模信号的输入使两管集电极电压有相同的变化。

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

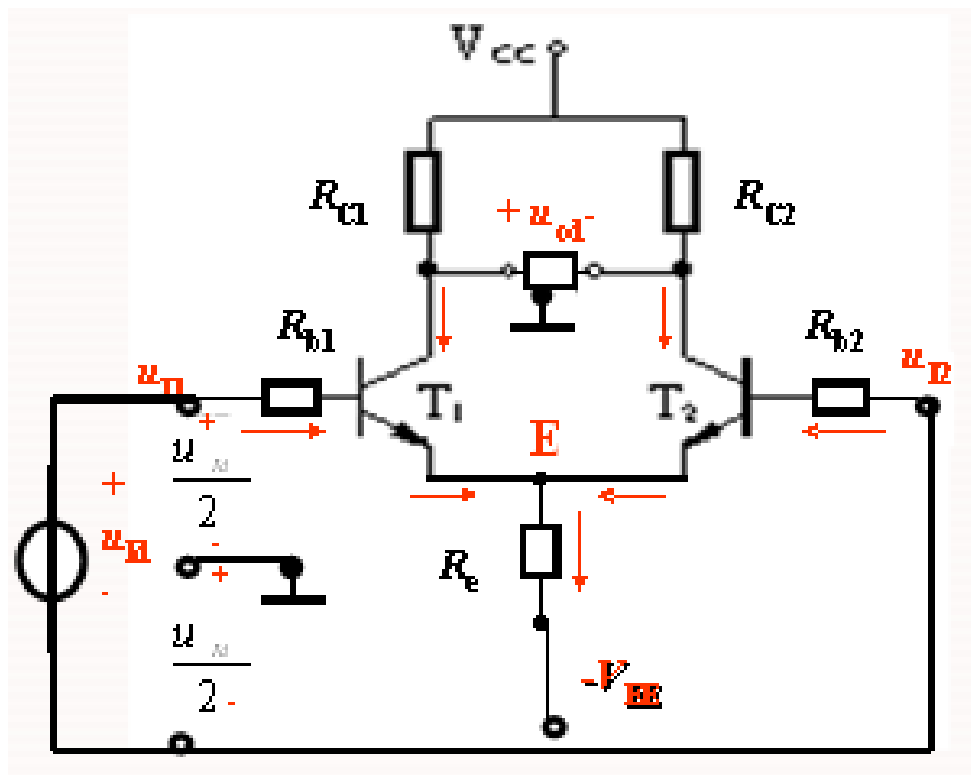
$$\text{共模增益 } A_C = \frac{\Delta u_{oc}}{\Delta u_{Ic}}$$

电路参数的理想对称性，温度变化时管子的电流变化完全相同，故可以将温度漂移等效成

共模信号，差分放大电路对共模信号有很强的抑制作用。

射极电阻 R_e 对共模信号的负反馈作用，抑制了每只晶体管集电极电流的变化，从而抑制集电极的电位的变化。

3.对差模信号的放大作用



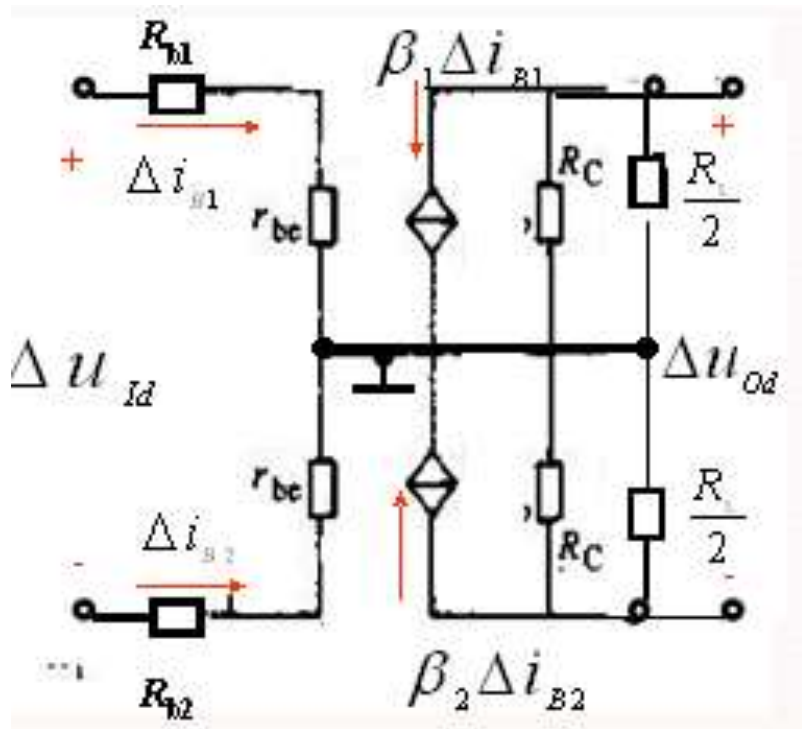
差分放大电路加差模信号 (a)

分析时注意二个“虚地”

E点电位在差模信号作用下不变，相当于接“地”。

负载电阻的中点电位在差模信号作用下不变，相当于接“地”。

差模信号作用下的等效电路



动态参数

$$A_d = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_{id}} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{i1} - u_{i2}}$$

$$= \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = - \frac{\beta(R_C // \frac{1}{2}R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be});$$

$$R_{od} = 2R_C$$

图3.3.5差分放大电路加差模信号 (b)

共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_D}{A_C} \right|$$

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_D}{A_C} \right| \text{ dB}$$

双端输出, 理想情况

$$K_{CMR} = \infty$$

三、差分放大电路的四种接法

基于不同的应用场合，有双、单端输入和双、单端输出的情况。

所谓“单端”指一端接地。

<A> **双入、双出**

 双入、单出

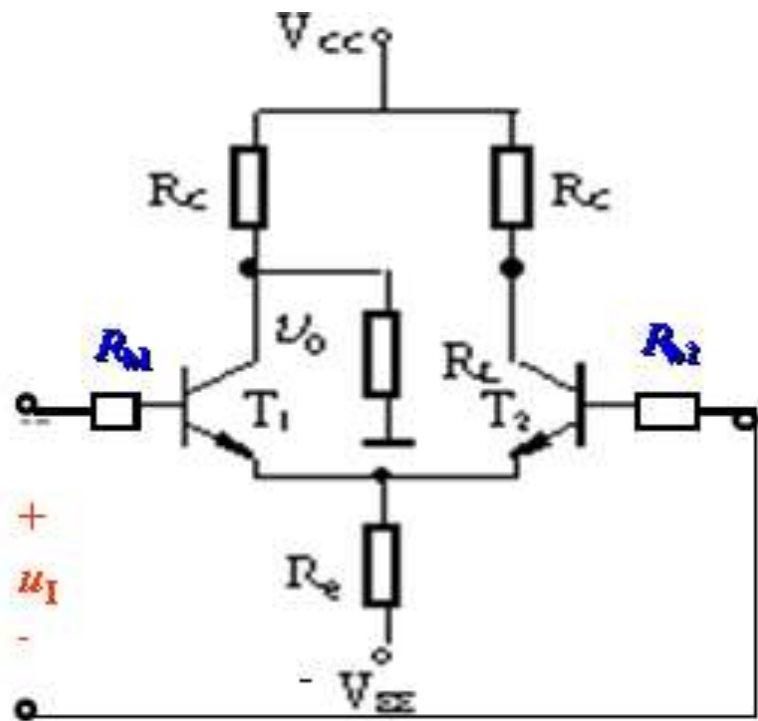
<C> **单入、双出**

<D> **单入、单出**

“单端”的情况，还具有共模抑制能力吗？

如何进一步改进呢？

1. 双端输入单端输出电路



双端输入单端输出差分放大电路

静态工作点

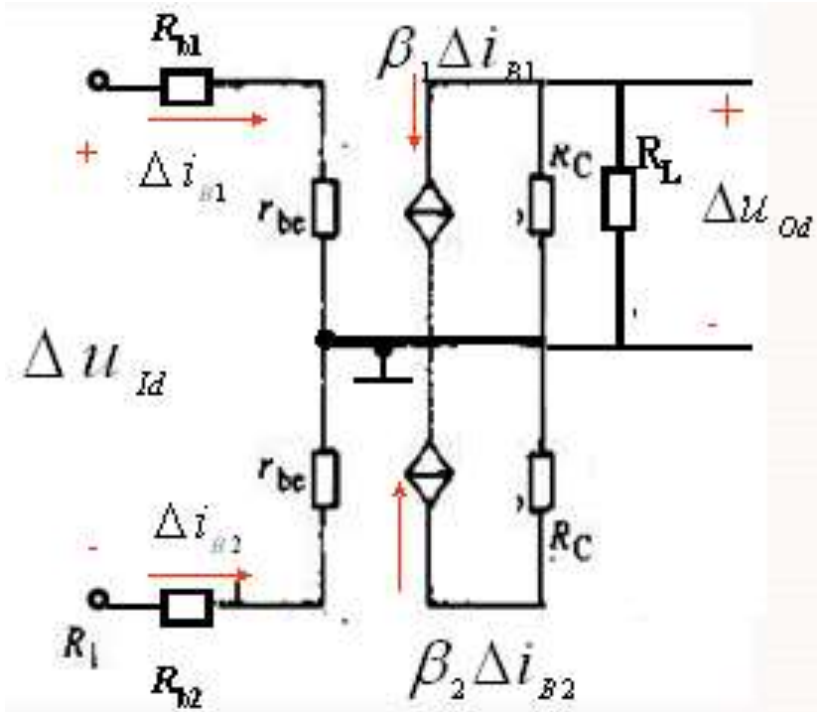
$$I_{E1} = I_{E2} = (U_{EE} - U_{BE}) / 2R_E$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{E1} / (1 + \beta)$$

$$U_{CE1} = U_O + U_{EE} - R_E I_E$$

注意：由于输出回路的不对称性， $U_{CEQ1} \neq U_{CEQ2}$ 。

动态分析



上图所示电路对差模信号的等效电路

$$A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_{od} = R_C$$

问题：如输出信号取自 T_2 管的集电极，动态分析结果如何？

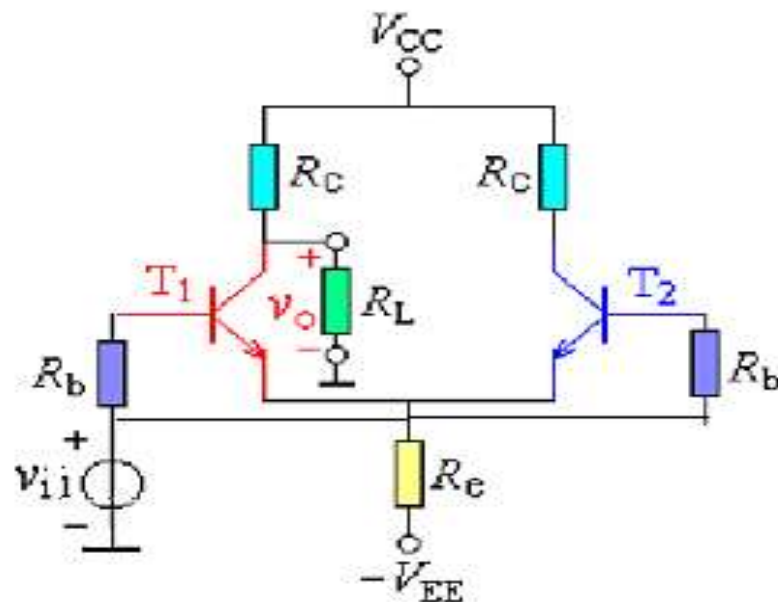
如输入共模信号：

共模电压增益

$$u_{oc} = -I_C R'_L;$$

$$u_{ic} = I_B [r_{be} + (1 + \beta) 2R_e];$$

$$\begin{aligned} A_c &= \frac{u_{oc}}{u_{ic}} \\ &= -\frac{\beta R'_L}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) 2R_e} \\ &\approx -\frac{R'_L}{2R_e} \end{aligned}$$



共模信号作用下的双入单出电路

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta) R_e}{2(R_b + r_{be})}$$

增大 R_e 是改善共模抑制比的基本措施

2. 单端输入、双端输出

静态分析

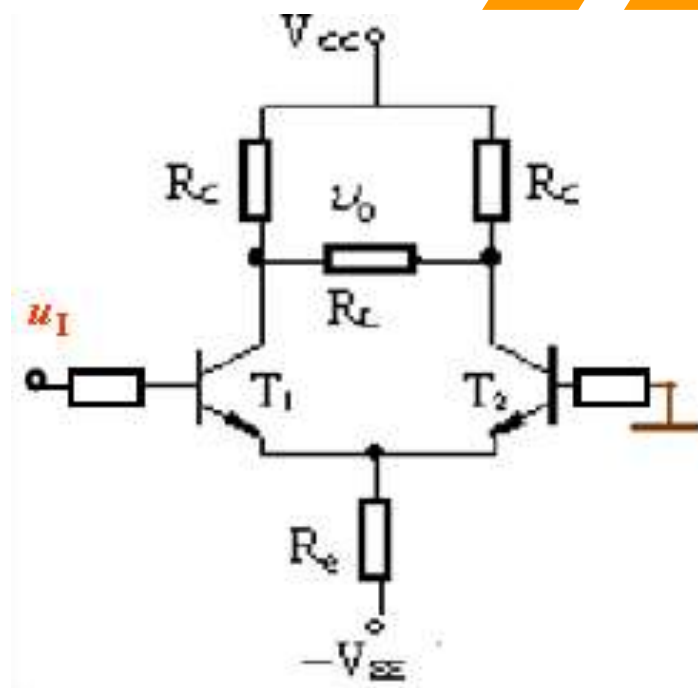
$$I_{E1} = I_{E2} = (V_{EE} - V_{BE}) / 2R_E ;$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{E1} / (1 + \beta)$$

$$V_{CE1} = V_{CE2} \approx V_{CC} + V_{EE} - (R_C + 2R_E) I_E$$

$$V_o = 0$$

与双入双出的一样



单端输入、双端输出电路a

3. 单端输入、单端输出

静态分析

$$I_E = (V_{EE} - V_{BE}) / 2R_E;$$

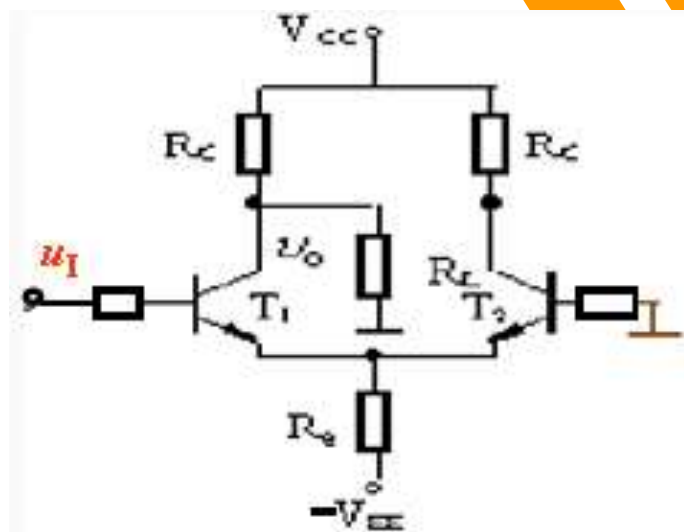
$$I_{B1} = I_{B2} = I_{E1} / (1 + \beta)$$

$$V_{CE1} = V_O + V_{EE} - R_E I_E$$

$$V_O = V_{CC} R_L / (R_C + R_L) - I_C R_L R_C / (R_C + R_L)$$

与双入单出的一样

动态分析：与双入单出的一样。（略）



单端输入单端输出电路

4.差动放大器动态参数计算总结

(1)差模电压放大倍数

与单端输入还是双端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时：

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

单端输出时：

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

(2)共模电压放大倍数

与单端输入还是双端输入无关，只与输出方式有关：

双端输出时： $A_{vc} = 0$ 单端输出时： $A_{vc} \approx -\frac{R'_L}{2R_e}$

(3)差模输入电阻

不论是单端输入还是双端输入，差模输入电阻 R_{id} 是基本放大电路的两倍。

$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

(4)输出电阻

单端输出时 $R_o = R_c$

双端输出时 $R_o = 2R_c$

(5) 共模抑制比

共模抑制比 K_{CMR} 是差分放大器的一个重要指标。

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

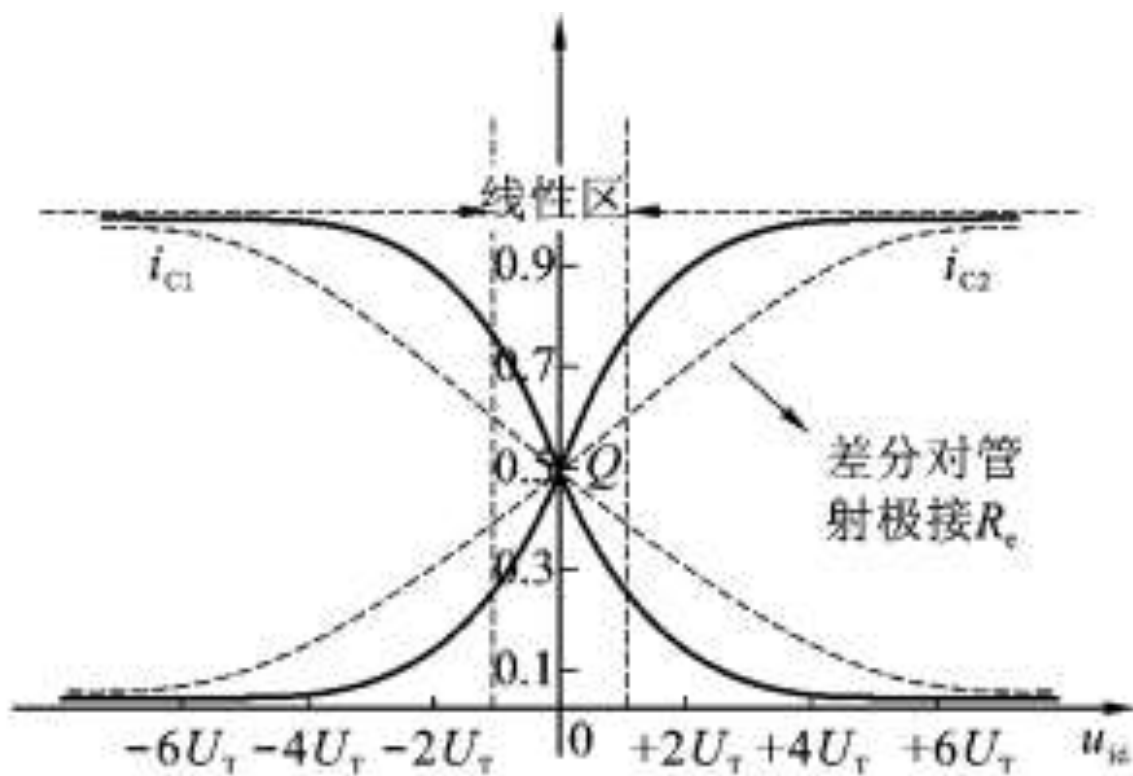
$$\text{或 } K_{\text{CMR}} = 20 \lg \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right| (\text{dB})$$

双端输出时 K_{CMR} 可认为等于无穷大，
单端输出时共模抑制比：

$$K_{\text{CMR}} = \frac{-\beta R'_L / 2(R_b + r_{\text{be}})}{-R'_L / 2R_e} \approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{\text{be}}}$$

6.2.3 差分放大器的传输特性

放大电路的输出电压和输入电压之间的关系曲线。



- (1) 当 $u_{id}=0$ 时, $i_{C1}/I_o=i_{C2}/I_o=0.5$, $i_{C1}+i_{C2}=I_o$, 电路处于静态工作状态。
- (2) 当 $|u_{id}| \leq U_T$ 时, 电路处于线性放大区。
- (3) 当 $|u_{id}| \geq 4U_T$ 时, 电路呈现良好的限幅特性。
- (4) 在差分对管射极分别串接电阻 R_e , 可扩大传输特性的线性工作范围。

6.3 恒流源

一、镜像电流源 (电流镜 Current Mirror)

基准电流
$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{BE1}}}{R}$$

由于 $U_{\text{BE1}} = U_{\text{BE2}}$, T_1 与 T_2 参数基本相同, 则

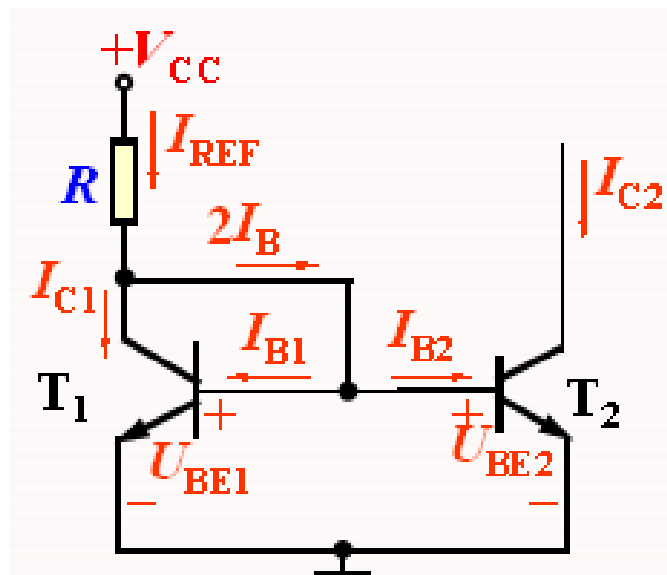
$$I_{\text{B1}} = I_{\text{B2}} = I_{\text{B}}; \quad I_{\text{C1}} = I_{\text{C2}} = I_{\text{C}}$$

$$I_{\text{C2}} = I_{\text{C1}} = I_{\text{REF}} - 2I_{\text{B}} = I_{\text{REF}} - 2 \frac{I_{\text{C2}}}{\beta}$$

所以
$$I_{\text{C2}} = I_{\text{REF}} \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

当满足 $\beta \gg 2$ 时, 则

$$I_{\text{C2}} = I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} - U_{\text{BE1}}}{R}$$



二、威尔逊电流源

T_1 管的c--e串联在 T_2 管的发射极，其作用与典型的工作点稳定电路中的 R_e 相同。

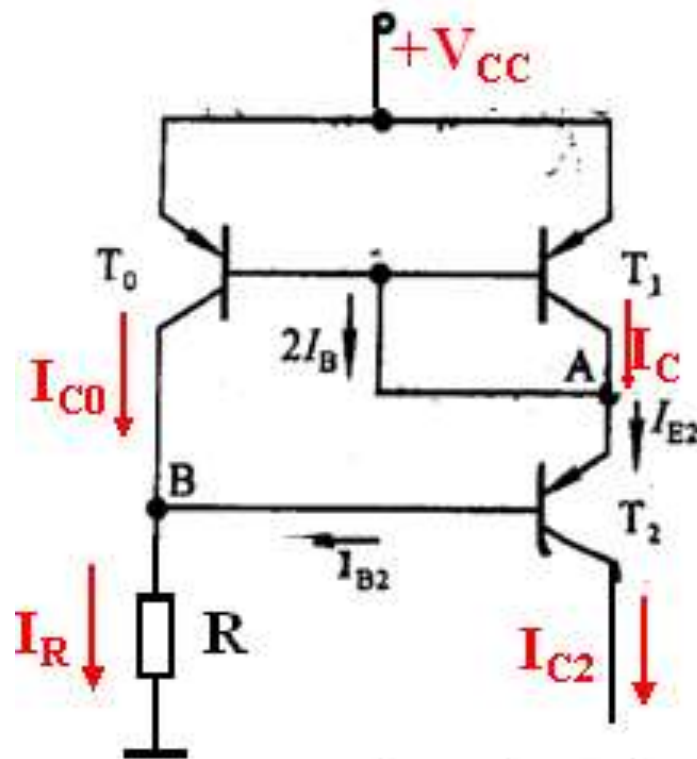
公式推导（略）

$$I_{C2} = \left(1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2}\right) I_R \approx I_R$$

当 $\beta=10$ $I_{C2}=0.984 I_R$

可见，在 β 很小时，也可认为 $I_{C2}=I_R$ 。 I_{C2} 受基极电流影响很小。

问题： I_R 如何计算？



威尔逊电流源

三、比例电流源

由图可得

$$U_{BE1} + I_{E1}R_1 = U_{BE2} + I_{E2}R_2$$

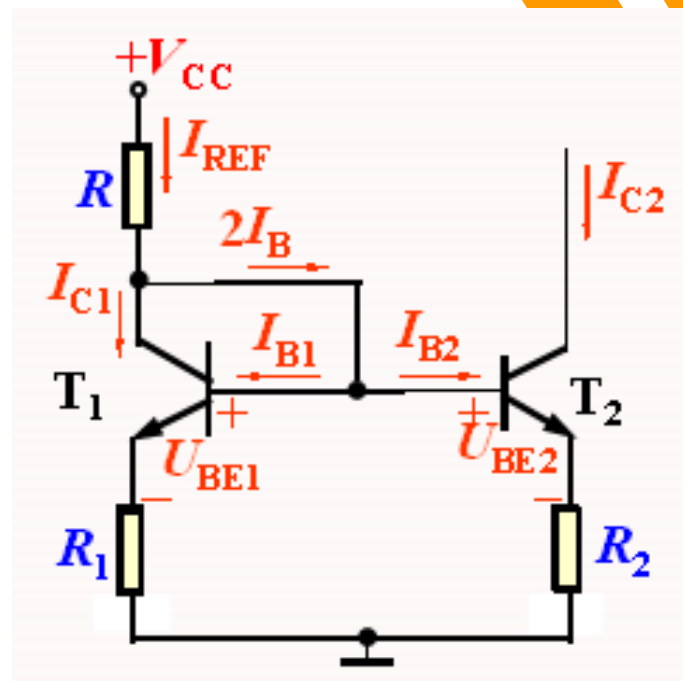
由于 $U_{BE1} \approx U_{BE2}$ ，则

$$I_{E1}R_1 \approx I_{E2}R_2$$

忽略基极电流，可得

$$I_{C2} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{C1} \approx \frac{R_1}{R_2} I_{REF}$$

两个三极管的集电极电流之比近似与发射极电阻的阻值成反比，故称为比例电流源。

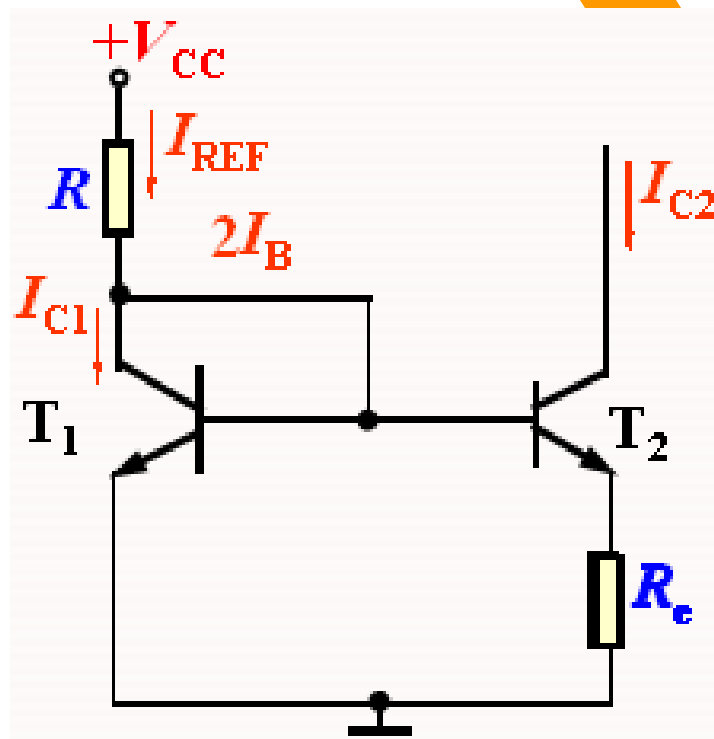


比例电流源

四、微电流源

在镜像电流源的基础上接入电阻 R_e 。

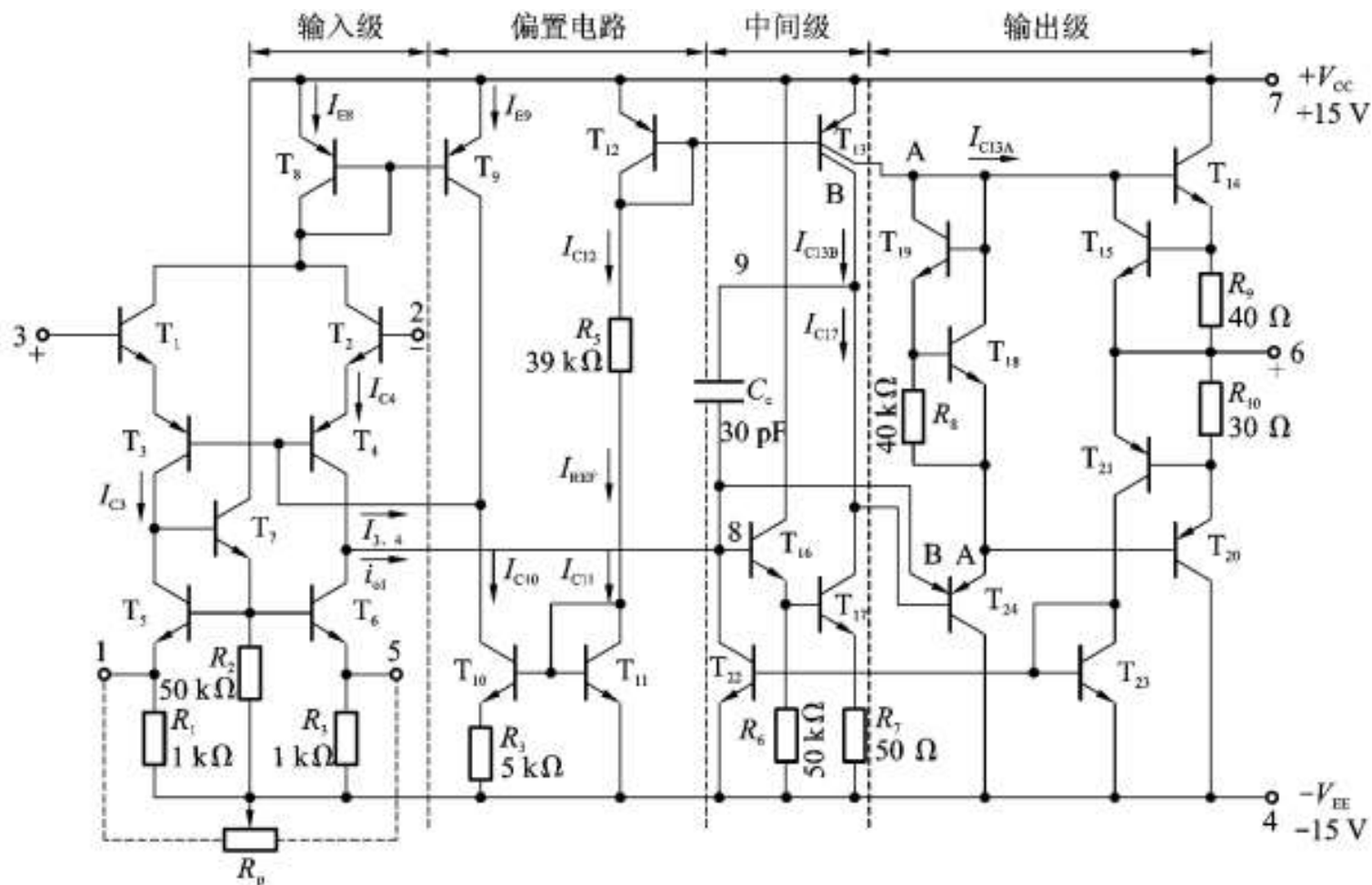
引入 R_e 使 $U_{BE2} < U_{BE1}$ ，且 $I_{C2} \ll I_{C1}$ ，即在 R_e 值不大的情况下，得到一个比较小的输出电流 I_{C2} 。



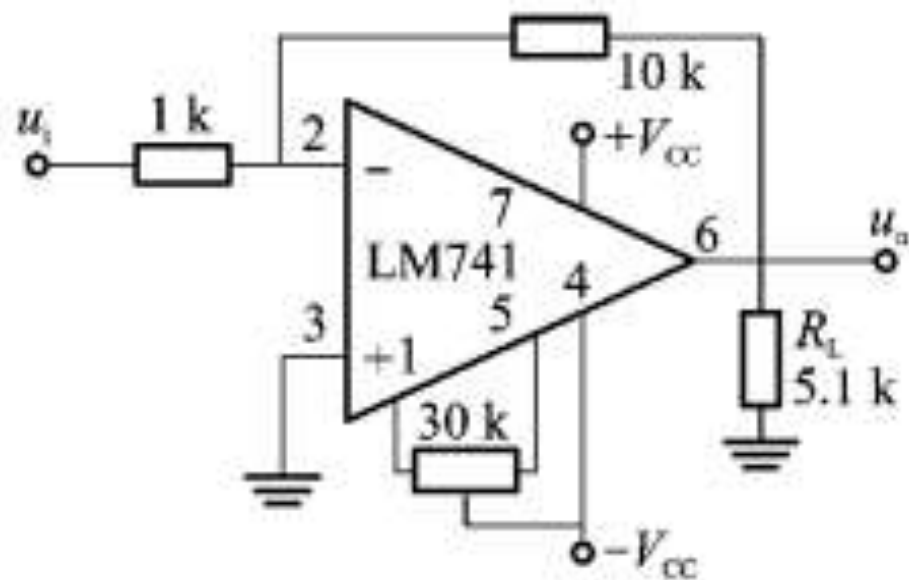
微电流源

6.4 集成放大器LM741内部电路的分析


1. LM741电路结构




- LM741基本接线图



- 无论多复杂的电子电路，均有各种基本单元电路组合而成。在读图时，可按以下步骤进行。
- (1) 综观全图，化整为零。由于电子电路是处理电信号的电路，因此，读图时应以信号传输途径为主线，把电路划分为若干个基本单元电路。
- (2) 分析单元电路的功能。
- (3) 化零为整。根据信号流向，把单元电路组合起来，分析整个电路的功能。
- (4) 分析电路中的改善环节，了解电路性能的优劣。

- 
- 1) 偏置电路
 - 偏置电路包含在各级电路中，采用多路偏置的形式为各级电路提供稳定的恒流偏置和有源负载，其性能的优劣直接影响其他部分电路的性能。其中，T10、T11组成的微电流源是整个集成运放的主偏置。
 - 2) 差动输入级
 - 差分输入级由以T1、T3和T2、T4组成的共集 共基组合的差分放大电路组成，它采取双端输入、单端输出的方式。在电路中，T5、T6、T7组成的改进型镜像电流源作为其有源负载，T8、T9组成的镜像电流源其提供恒流偏置。
 - 由于上述的结构组成，使输入级具有共模抑制比高、输入电阻大、输入失调小等特点，是集成运放中最关键的一部分电路。

- 
- 3) 中间增益级
 - 中间增益级由T17构成的共发射极电路组成。在电路中，T13B和T12组成的镜像电流源为其集电极有源负载，故本级可获得很高的电压增益。
 - 4) 互补输出级
 - 互补输出级由以T14、T20构成的甲乙类互补对称放大电路组成。在电路中，T18、T19、R8组成的电路用于克服交越失真，T12和T13A组成的镜像电流源为其提供直流偏置。该输出级输出电压大，输出电阻小，带负载能力强。

6.5 集成放大器的使用参数

一、开环差模电压增益 A_{od}

一般用对数表示，定义为

$$A_{od} = 20\lg \left| \frac{\Delta U_o}{\Delta U_- - \Delta U_+} \right| \quad \text{单位：分贝}$$

理想情况 A_{od} 为无穷大； 实际情况 A_{od} 为 100 ~ 140 dB。

二、输入失调电压 U_{IO}

定义：为了使输出电压为零，在输入端所需要加的补偿电压。

一般运放： U_{IO} 为 1 ~ 10 mV；

高质量运放： U_{IO} 为 1 mV 以下。

三、输入失调电压温漂 α_{UIO}

定义：
$$\alpha_{UIO} = \frac{dU_{IO}}{dT}$$

一般运放为每度 10 ~ 20 μV ；

高质量运放低于每度 0.5 μV 以下；

四、输入失调电流 I_{IO}

定义：当输出电压等于零时，两个输入端偏置电流之差，即

$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

一般运放为几十 ~ 一百纳安；高质量的低于 1 nA。

五、输入失调电流温漂 α_{IO}

定义：

$$\alpha_{IO} = \frac{dI_{IO}}{dT}$$

一般运放为每度几纳安；高质量的每度几十皮安。

六、输入偏置电流 I_{IB}

定义：输出电压等于零时，两个输入端偏置电流的平均值。

$$I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$$

七、差模输入电阻 r_{id}

定义： $r_{id} = \frac{\Delta U_{Id}}{\Delta I_{Id}}$ 一般集成运放为几兆欧。

八、共模抑制比 K_{CMR}

定义： $K_{CMR} = 20\lg \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$

多数集成运放在 80 dB 以上，高质量的可达 160 dB。

九、最大共模输入电压 U_{Icm}

输入端所能承受的最大共模电压。

十、最大差模输入电压 U_{Idm}

反相输入端与同相输入端之间能够承受的最大电压。

十一、-3 dB带宽 f_H

表示 A_{od} 下降 3 dB 时的频率。一般集成运放 f_H 只有几赫至几千赫。

十二、单位增益带宽 f_c

A_{od} 降至 0 dB 时的频率，此时开环差模电压放大倍数等于 1。

十三、转换速率 SR

额定负载条件下，输入一个大幅度的阶跃信号时，输出电压的最大变化率。单位为 $V / \mu s$ 。

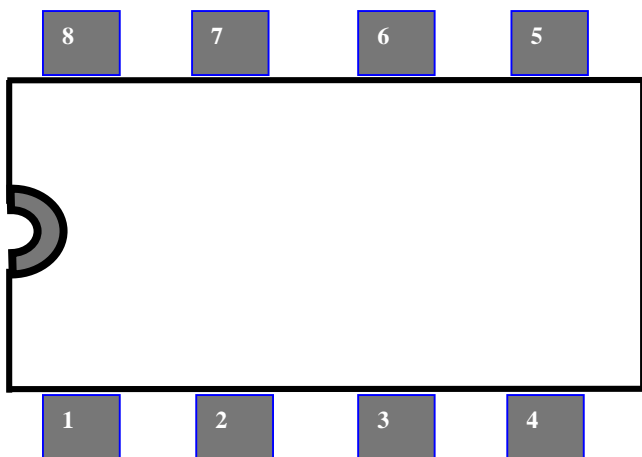
在实际工作中，输入信号的变化率一般不要大于集成运放的 SR 值。

其他技术指标还有：最大输出电压、静态功耗及输出电阻等。

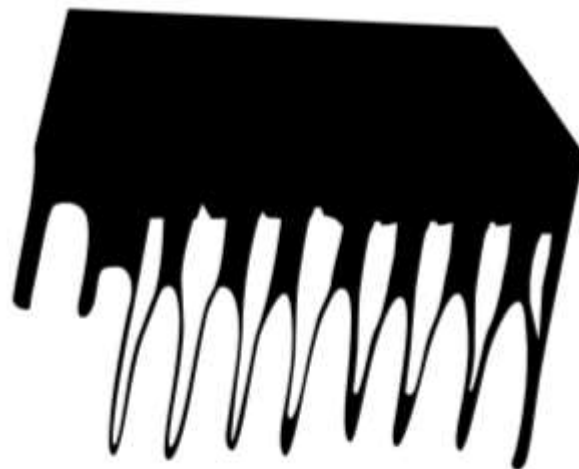
扩展阅读

双极型集成运放 F007

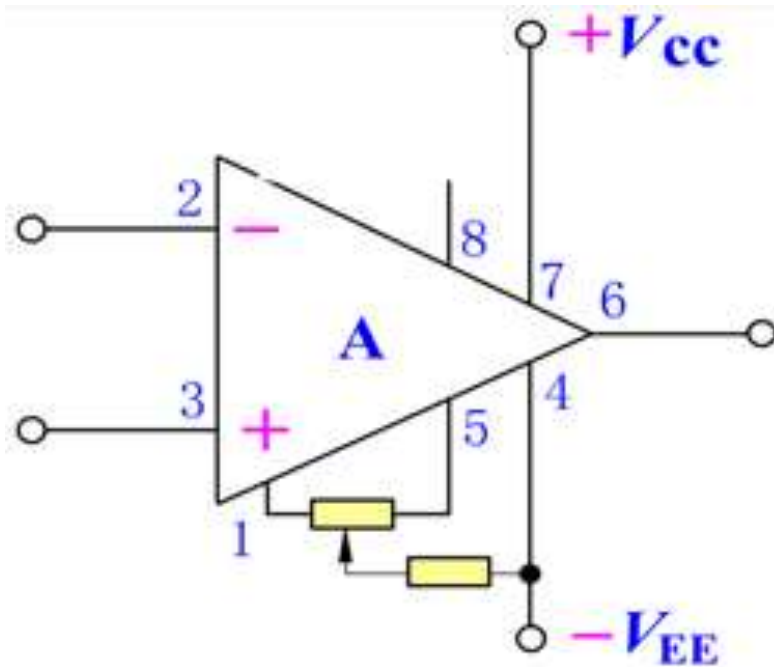
一、引脚



(b) 实物图

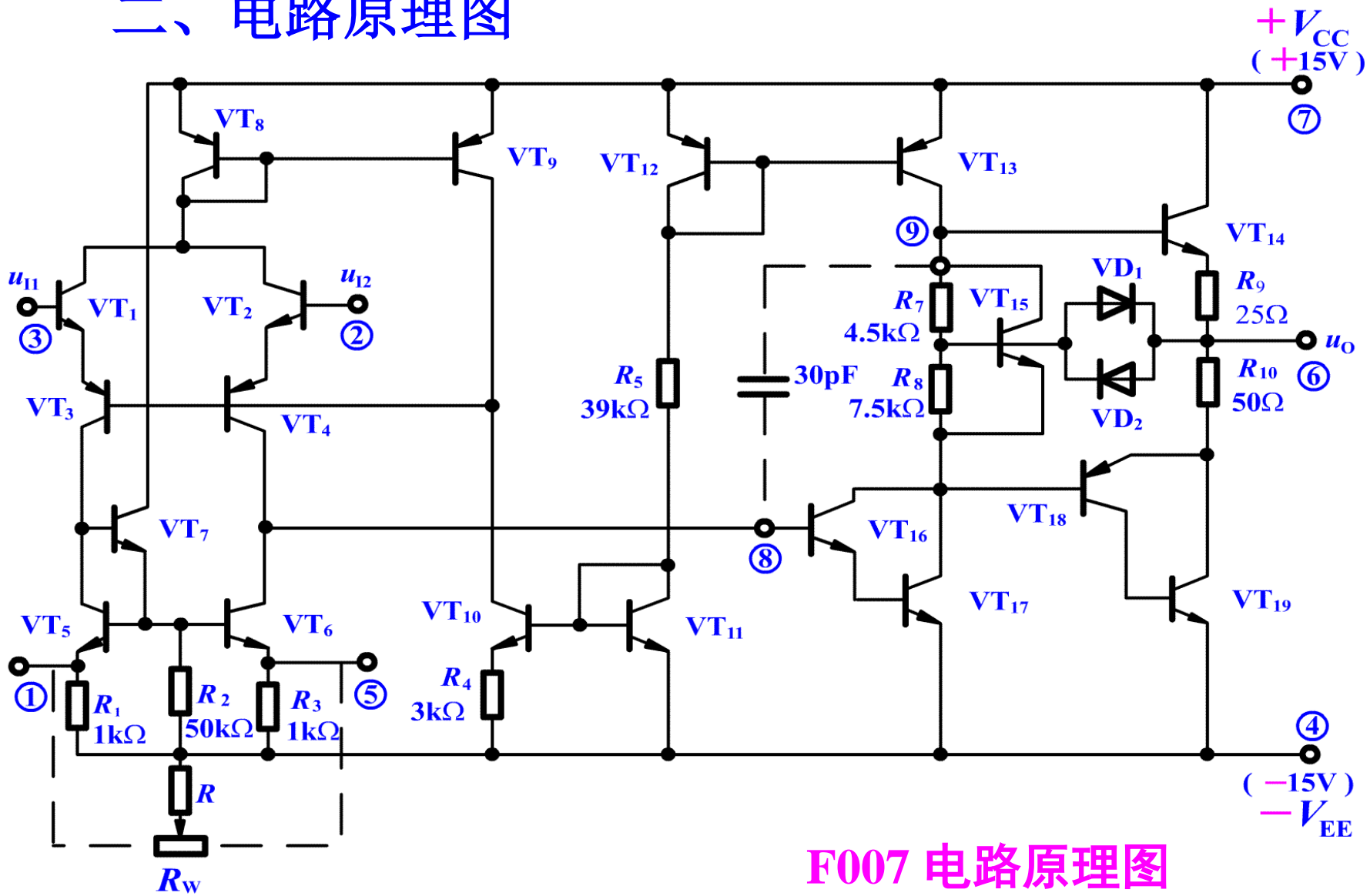


F007 的引脚及实物图



F007 的连接示意图

二、电路原理图



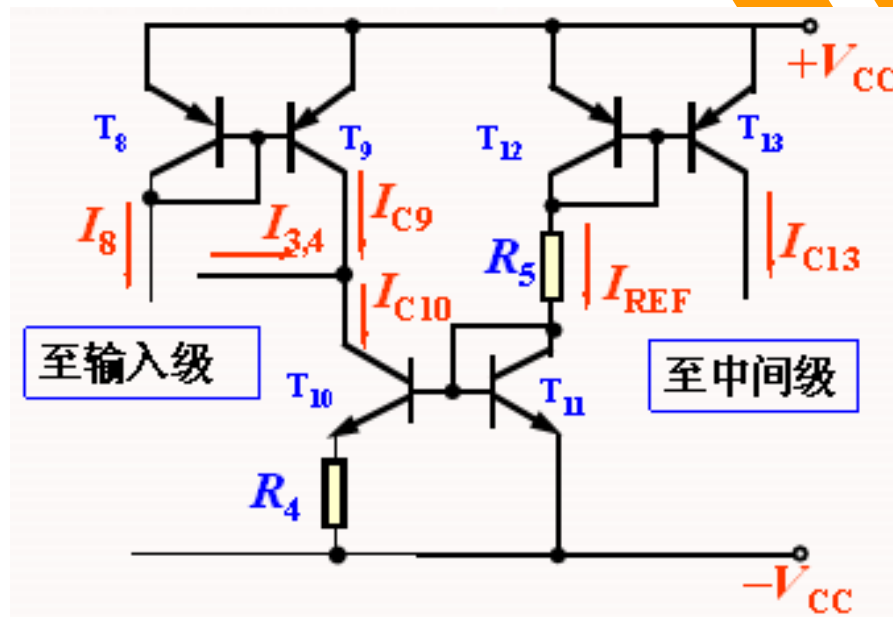
F007 电路原理图

1. 偏置电路

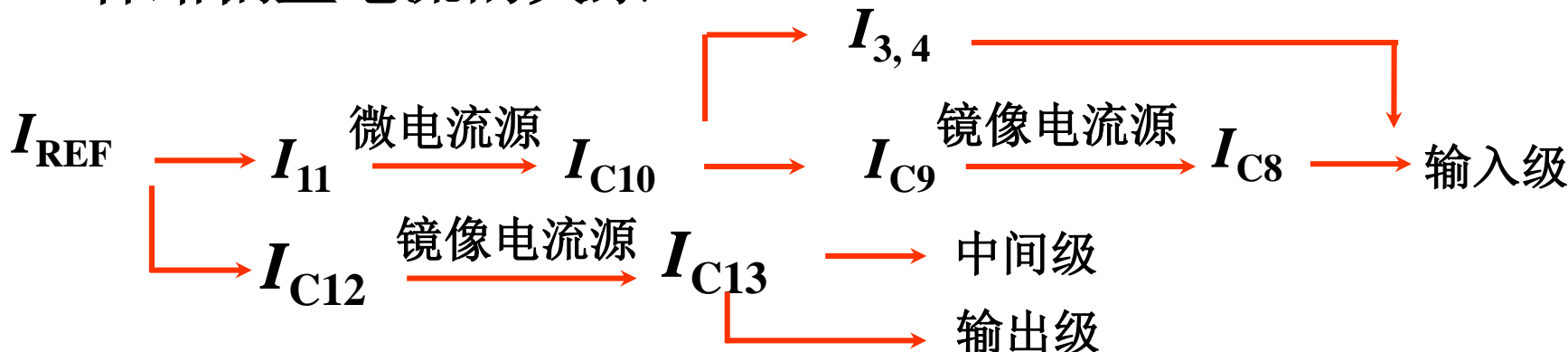
基准电流:

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - U_{BE12} - U_{BE11}}{R_5}$$

基准电流产生各放大级所需的偏置电流。



各路偏置电流的关系:



F007 的偏置电路

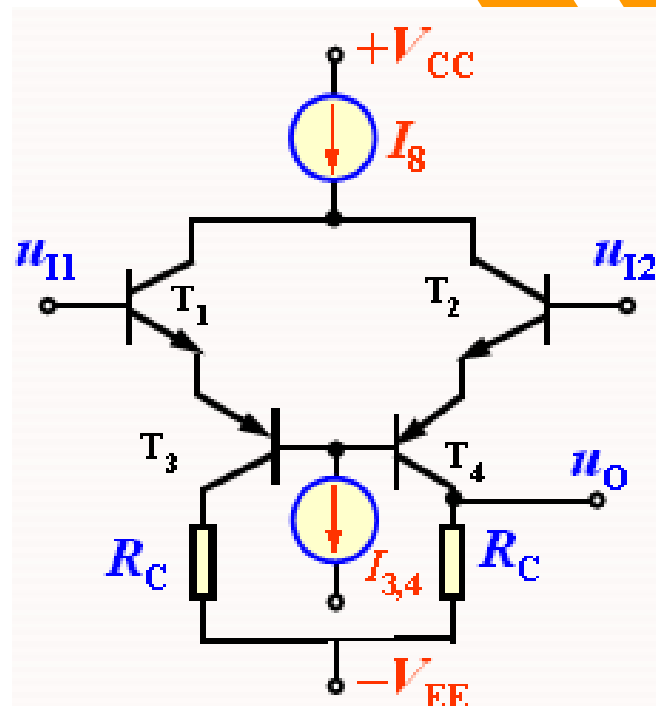
若暂不考虑 T_7 和调零电路则电路可简化为:

(1). T_1 、 T_2 共集组态, 具有较高的差模输入电阻和共模输入电压。

(2). 共基组态的 T_3 、 T_4 , 与有源负载 T_5 、 T_6 组合, 可以得到很高的电压放大倍数。

(3). T_3 、 T_4 共基接法能改善频率响应。

(4). 该电路具有共模负反馈, 能减小温漂, 提高共模抑制比。



上图的
简化示意图

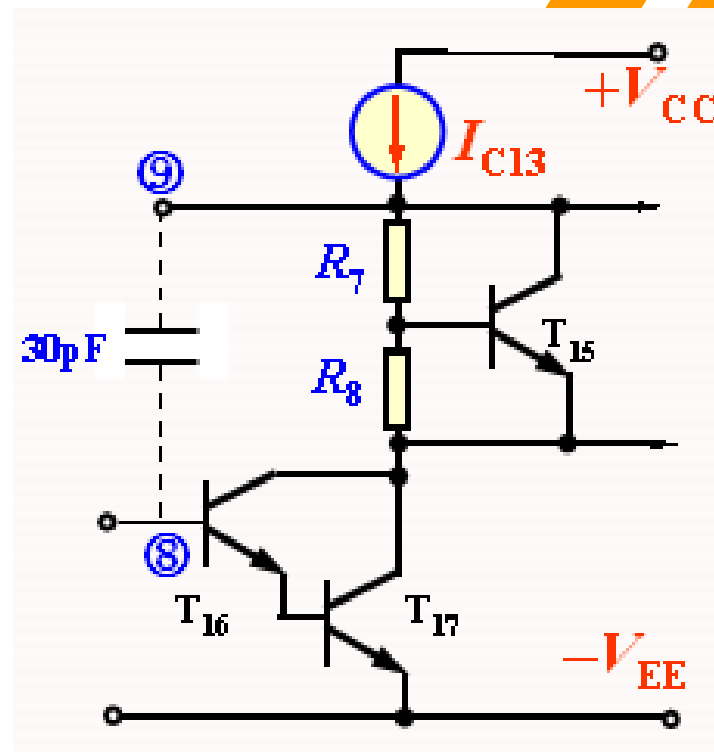
3. 中间级

输入来自 T_4 和 T_6 集电极；

输出接在输出级的两个互补对称放大管的基极。

中间级 T_{16} 、 T_{17} 组成复合管， T_{13} 作为其有源负载。

8、9 两端外接 30pF 校正电容防止产生自激振荡。



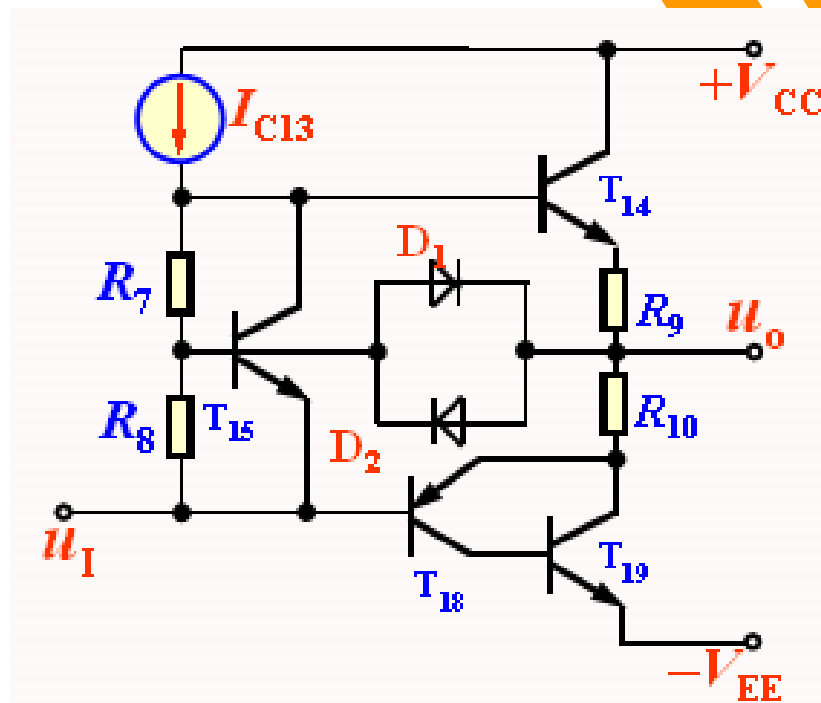
中间级示意图

4. 输出级

T_{14} 、 T_{18} 、 T_{19} 准互补对称电路；

D_1 、 D_2 、 R_9 、 R_{10} 过载保护电路；

T_{15} 、 R_7 、 R_8 为功率管提供静态基流。



$$U_{CE15} \approx \frac{R_7 + R_8}{R_8} U_{BE15} \approx \left(1 + \frac{R_7}{R_8}\right) \times 0.7 \text{ V} \quad \text{F007 输出级原理电路}$$

调节 R_7 、 R_8 阻值可调节两个功率管之间的电压差。
这种电路称为 U_{BE} 倍增电路。