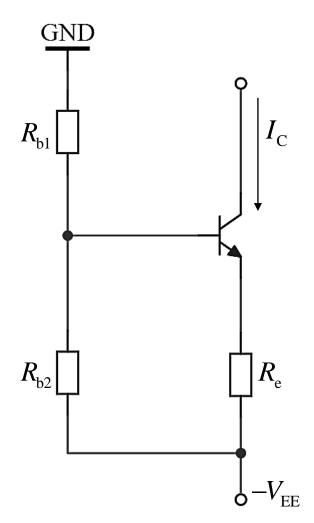


电流源电路



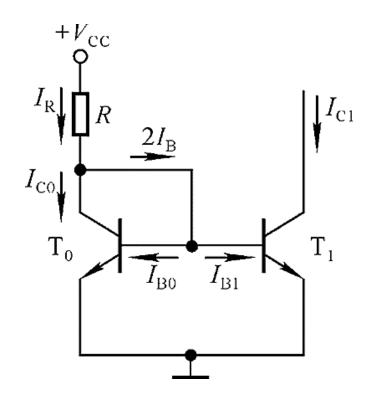


在前面的差分放大电路部分中我们分析过,一个静态工作点稳定的单管共射放大电路可以作为一个恒流源,设定了其输入回路偏置电阻的大小,便可以控制输出电流即集电极电流的大小并保持稳定;

这样的一个恒流源电路静态时等效为一个较小的电阻,可以为其他电路提供偏置电流建立合适的静态工作点;而动态时其输出电阻近似无穷大,等效为无穷大的动态电阻,输出端电位变化时动态电流非常小;

电流源电路





两个晶体管特性完全相同

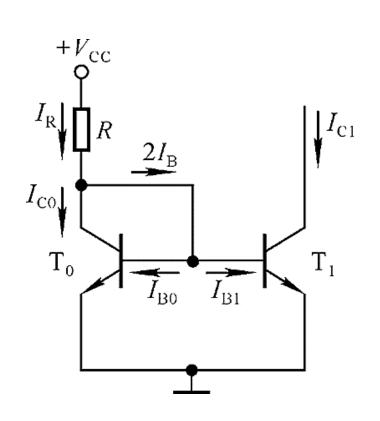
TO 侧为基准端(输入端), T1 侧为输出端 输出电流跟随输入电流——"镜像"

结构特点:

- 两个晶体管共基极 ("背靠背");
- 其中一个晶体管的集电极与基极相连(等电位), 作为基准端;
- 两个晶体管均无发射极电阻

电流源电路





TO 管即基准管的集电极电位等于基极电位,因此能够保证其始终工作在放大区;

两个晶体管基极电位相同,发射极电位相同,电流完全对称;

$$\begin{cases} I_{\text{C1}} = I_{\text{C0}} = I_{\text{R}} - 2I_{\text{B}} \\ I_{\text{C1}} = I_{\text{C0}} = \beta I_{\text{B}} \end{cases} \Rightarrow I_{\text{C1}} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_{\text{R}}$$

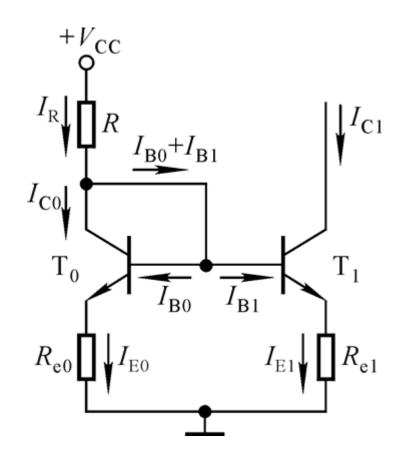
当 $\beta >> 2$ 时,满足 $I_{C1} \approx I_{R}$,输出电流与基准电流近似相等,

基准电流即输入电流可以通过设定电阻 R 的大小:

$$I_{\rm R} = \frac{V_{\rm CC} - U_{\rm BE}}{$$
原作者:b站up主—这个ximo不太冷

电流源电路





两个晶体管特性完全相同
TO 侧为基准端(输入端),T1 侧为输出端
输出电流与输入电流呈比例关系

结构特点:

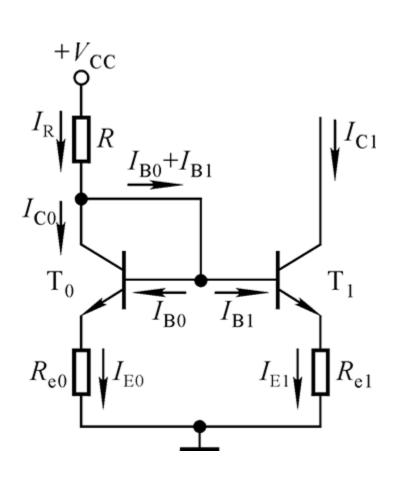
- 两个晶体管共基极 ("背靠背");
- 其中一个晶体管的集电极与基极相连(等电位), 作为基准端;
- 两个晶体管均含有发射极电阻

|不要将课件上传至网上的各个公共平台,谢谢! |在的错误可以在b站私信反馈给我,不胜感激!

电流源电路

忽略对数项实质上在作什么近似? (认为晶体管输入伏安特性曲线为垂直的直线, 即两个晶体管的发射结压降相等)





每个晶体管的发射极电流与发射结压降的关系近似为: (回顾第二章晶体管 每个面积 医用力 C C C 的小信号等效电路模型,忽略 $r_{bb'}$ $I_{E} pprox I_{S} e^{\frac{U_{BE}}{U_{T}}} \Leftrightarrow U_{BE} pprox U_{T} \ln \frac{I_{E}}{I_{S}}$

$$I_{\rm E} pprox I_{\rm S} e^{\frac{U_{\rm BE}}{U_{\rm T}}} \Leftrightarrow U_{\rm BE} pprox U_{\rm T} \ln \frac{I_{\rm E}}{I_{\rm S}}$$

(Is为反向饱和电流, Ur为温度电压常量, 都是 PN 结伏安特性曲线的参数)

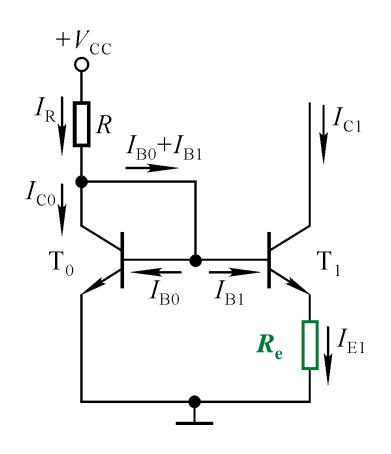
 $I_{\rm E0}R_{\rm e0} + U_{\rm BE0} = I_{\rm E1}R_{\rm e1} + U_{\rm BE1}$ 两个晶体管基极电位相等:

可以推导出两个发射极电流的关系: $I_{E1}R_{e1} = I_{E0}R_{e0} + U_{T} \ln \frac{I_{E0}}{I}$

<u>忽略对数项</u>,且β>>2,集电极电流近似为发射极电流,T0基准电流近似 为集电极电流,即可推出比例电流关系:

电流源电路





两个晶体管特性完全相同

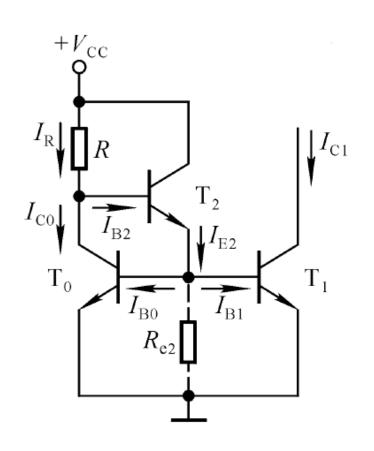
TO 侧为基准端(输入端), T1 侧为输出端 输出电流很小

结构特点:

- 两个晶体管共基极 ("背靠背");
- 其中一个晶体管的集电极与基极相连(等电位), 作为基准端;
- 输出侧晶体管含发射极电阻而输入侧没有;

电流源电路





结构特点:相较于普通的镜像电流源,基准管的基极与集电极不是直接相连而是通过一个晶体管(射级输出形式)相连;

原理分析: 假设晶体管参数完全相同,根据 KCL 和晶体管电流关系:

$$I_{C1} = I_{C0}$$

$$I_{R} = I_{C0} + I_{B2} = I_{C0} + \frac{I_{E2}}{1+\beta} = I_{C0} + \frac{2I_{B0}}{1+\beta} = I_{C0} + \frac{2I_{C0}}{\beta(1+\beta)}$$

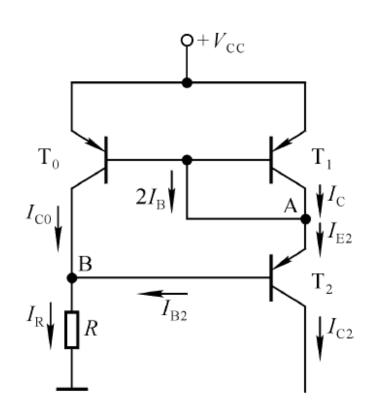
$$I_{C1} = \frac{\beta^{2} + \beta}{\beta^{2} + \beta + 2} I_{R} \Rightarrow I_{C1} \approx I_{R}$$

此电流源的误差小于普通的镜像电流源的误差(分母阶数) 因此相对较小的放大系数也可以实现较高精度的跟随 在b站私信反馈给我,不胜感激!

电流源电路



威尔逊电流源



结构特点:相较于普通的镜像电流源,输出侧增加了一个晶体管

原理分析: 假设晶体管参数完全相同, 根据 KCL 和晶体管电流关系:

$$I_{C2} = \frac{\beta}{1+\beta} I_{E2} = \frac{\beta}{1+\beta} (2I_{B} + I_{C1}) = \frac{\beta}{1+\beta} (2\frac{I_{C0}}{\beta} + I_{C0}) = \frac{2+\beta}{1+\beta} I_{C0}$$

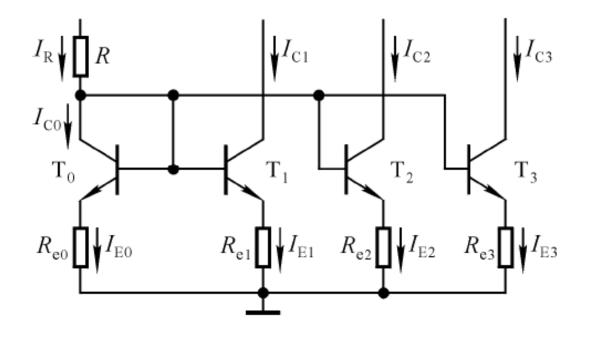
$$I_{R} = I_{C0} + I_{B2} = I_{C0} + \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I_{C2} = (1 - \frac{2}{\beta^{2} + 2\beta + 2})I_{R} \Rightarrow I_{C2} \approx I_{R}$$

类似于带射级输出器的精密电流源,威尔逊电流源的误差小于 普通的镜像电流源的误差(分母阶数) 原作者:b站up王—这个ximo不太冷

电流源电路

○ 多路电流源



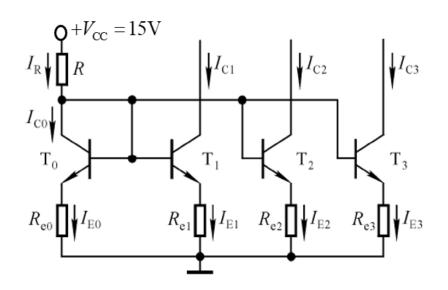
由一个基准电流控制多个输出电流

原理类似,单独分析即可

电流源电路

○ 例 1

多路电流源电路如图所示,已知晶体管 $T_0 \sim T_3$ 的特性完全相同, $\beta >> 4$; 各管的 U_{BE} 均为 0.7 V ; 已知 $R=10 \text{ k}\Omega$, $R_{e0}=5 \text{ k}\Omega$, $R_{e1}=3 \text{ k}\Omega$, $R_{e2}=2 \text{ k}\Omega$, $R_{e3}=1 \text{ k}\Omega$; 试估算 I_{E1} 、 I_{E2} 、 I_{E3} 的大小 ;



电流源电路



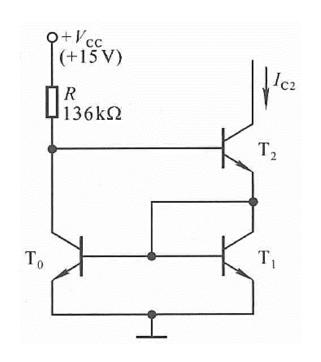
教材上只是给出了几种典型的电流源电路的示例,实际上还可以有很多派生的电流源电路结构,例如4个晶体管的威尔逊电流源;再例如即使是镜像电流源,根据晶体管类型、输入输出是否接地还可以有不同的类型和画法;另外,教材中给出的举例都是静态的电流跟随,通过基准电阻来设置基准电流的大小,事实上如果输入动态电流,也可以按照类似的方法分析得到电流关系;

因此,对于电流源电路,需要掌握其电路的基本结构特点、基本原理(电流关系), 不能只是简单地记忆;

电流源电路

○ 例 2

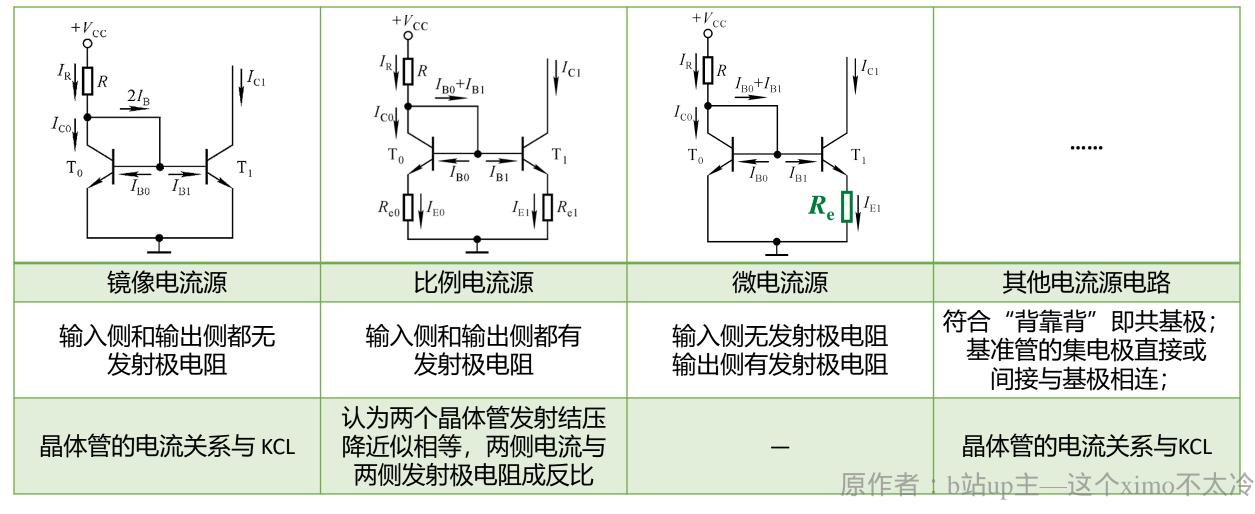
电路如图所示,已知 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 100$; 各管的 U_{BE} 均为0.7V,试求 T_2 集电极电流 I_{C2} 的值。



电流源电路



电流源电路小结



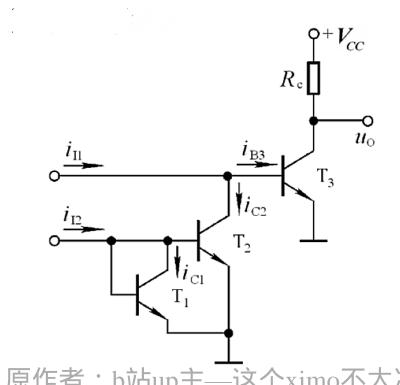
在b站私信反馈给我,不胜感激!

电流源电路



电路如图所示,已知晶体管 $T_1 \sim T_3$ 的特性完全相同, $\beta >> 2$; 求解:

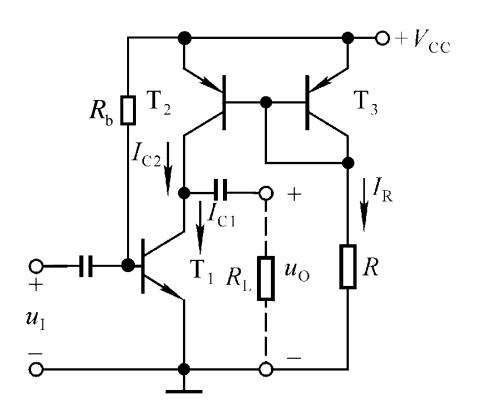
- (1) $i_{\rm C2} \approx$?
- (2) $i_{\text{B3}} \approx ?$
- (3) $A_{\text{ui}} = \Delta u_{\text{O}} / \Delta (i_{\text{I}1} i_{\text{I}2}) \approx ?$



电流源电路



电流源电路作为放大电路的有源负载



电流源电路除了用来作为集成运放内部的偏置电路, 提供偏置电流设置静态工作点之外,另一个用途是 作为放大电路的有源负载,所谓"有源负载"即利 用有源器件如晶体管/场效应管组成的电路结构来 代替传统的电阻(无源元件);

如图为镜像电流源作为共射放大电路的有源负载:

静态时,调节 R 和 R_b 的大小使集电极电流与基极电流满足 β 倍的放大关系即可设置合适的静态工作点;

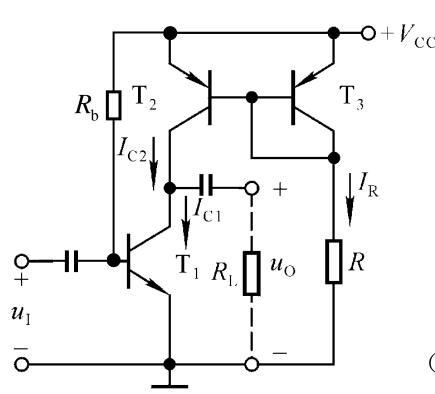
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台,谢谢!

存在的错误可以在b站私信反馈给我,不胜感激!

要对第二章足够熟练,应做到 不绘制出交流通路即可得到动态物理量关系!

电流源电路





动态时,考虑输入电压变化导致基极电流变化进而导致 集电极电流变化 Δi_c ;

把 T2 管的集电极看作输出端口, 其动态时的等效电阻 为 r_{ce2} , 近似无穷大 , T1 管集电极与发射极之间的等效 动态电阻也近似无穷大, 因此动态时集电极电流的变化 量几乎全部流向负载电阻 R₁; (思考等效电路回路图)

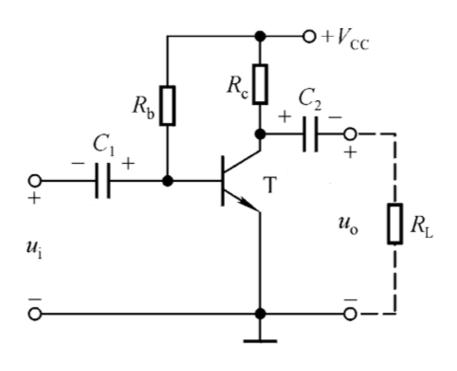
$$\Delta u_{\rm o} = -\Delta i_{\rm L} R_{\rm L} \approx -\Delta i_{\rm c} R_{\rm L} = -\beta_{\rm l} \Delta i_{\rm b} R_{\rm L} = -\frac{\beta_{\rm l} R_{\rm L}}{r_{\rm bel}} \Delta u_{i} \Longrightarrow A_{\rm u} = -\frac{\beta_{\rm l} R_{\rm L}}{r_{\rm bel}}$$

(更准确: $A_{u} = -\frac{\beta_{l}(R_{L}//r_{cel}//r_{ce2})}{R_{cel}}$,解题时通常不考虑 c-e 间等效电阻)

电流源电路



普通放大电路电压放大倍数难以提高的原因



在一定电源电压下,设置合适的静态工作点后 电压放大倍数受到限制

传统的共射放大电路(以阻容耦合为例)电压放大倍数:

$$A_{\rm u} = \frac{\dot{U}_{\rm o}}{\dot{U}_{\rm i}} = \frac{-\beta \dot{I}_{\rm b} (R_{\rm c} /\!/ R_{\rm L})}{r_{\rm be} \dot{I}_{\rm b}} = \frac{-\beta (R_{\rm c} /\!/ R_{\rm L})}{r_{\rm be}}$$

可见, 动态集电极电流的变化量并不是完全传递给负载, 而是有一部分流向集电极电阻; 从表达式上看, 仿佛简 单地增大 R_c 即可提高电压放大倍数, 然而, 不要忘记 表达式中的动态电阻 rbe 是和静态工作点有关的物理量:

$$r_{\rm be} = \frac{U_{\rm be}}{I_{\rm b}} = r_{\rm bb'} + r_{\rm b'e} \approx r_{\rm bb'} + (1 + \beta) \frac{U_{\rm T}}{I_{\rm EQ}}$$

通常静态工作点对静态管压降是有要求的,因此若管压降 要求控制一定,过大的 R_c 导致很小的电流,会近似正比 地增加 r_{be} 的大小,电压放大倍数几乎不会变化;为了平 衡压降和电流大小,需要大幅度提高电源电压,不合理;

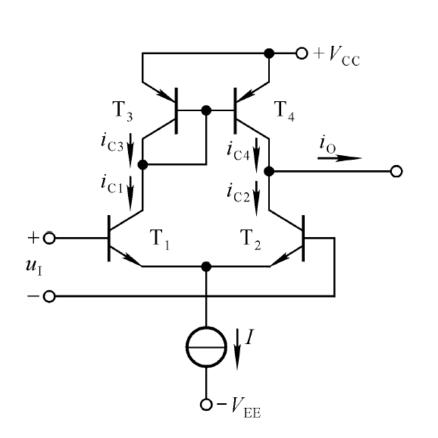
思考:

电流源电路

如果是双端输出,差模电压放大倍数是否仍然与单管共射的相当?

($\Delta i_{c1} = -\Delta i_{c2}$ 关系不改变)

含有有源负载的差分放大电路



如图所示, 镜像电流源取代了传统差分放大电路中两边的集电极电阻; 这个镜像电流源最重要的作用便是使 T4 的集电极电流变化跟随 T3 的集电极电流变化; (T3 b 与 c 相连, 为基准管)

考虑差模信号输入,两侧的信号源大小相等,极性相反假设按如所示 T2 侧单端输出:

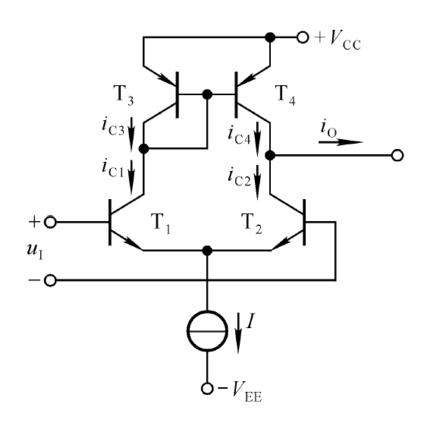
$$\begin{cases} \Delta i_{\rm c1} = -\Delta i_{\rm c2} \\ \Delta i_{\rm c1} \approx \Delta i_{\rm c3} (\Delta i_{\rm c3} >> 2\Delta i_{\rm b3}) \Longrightarrow \Delta i_{\rm c4} = -\Delta i_{\rm c2} \Longrightarrow \Delta i_{\rm o} = 2\Delta i_{\rm c1} \\ \Delta i_{\rm c4} = \Delta i_{\rm c3} \end{cases}$$

$$\Delta u_{\rm o} = \Delta i_{\rm o} R_{\rm L} = 2\Delta i_{\rm c1} R_{\rm L} = \frac{2\beta R_{\rm L}}{2r_{\rm be}} \Delta u_{\rm Id} \Longrightarrow A_{\rm d} = \frac{\beta R_{\rm L}}{r_{\rm be}}$$

可见即使是单端输出,其电压放大倍数相当于单管共射的电压放大倍数而不再是二分之一; (T2侧输出因此电压放大倍数为压)不太冷

电流源电路

含有有源负载的差分放大电路



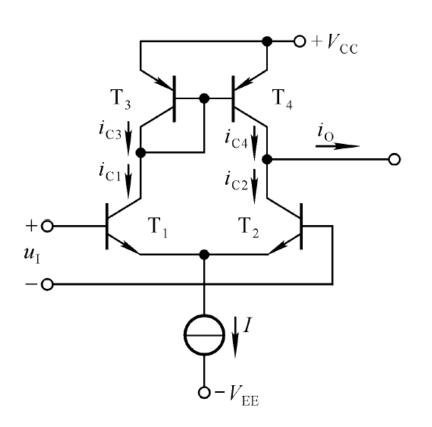
考虑共模信号输入,两侧的信号源大小相等,极性相同 假设按如所示 T2 侧单端输出:

$$\begin{cases} \Delta i_{c1} = \Delta i_{c2} \\ \Delta i_{c1} \approx \Delta i_{c3} (\Delta i_{c3} >> 2\Delta i_{b3}) \Rightarrow \Delta i_{c4} = \Delta i_{c2} \Rightarrow \Delta i_{o} = 0 \\ \Delta i_{c4} = \Delta i_{c3} \end{cases}$$

可见即使下方是普通的长尾电阻而非恒流源,通过镜像电流源的作用也能够使共模信号输入时,单端输出负载中几乎没有动态电流流过,实现对共模信号很强的抑制,可以认为 $A_c = 0$;

电流源电路

含有有源负载的差分放大电路



根据前面的分析,镜像电流源作为差分放大电路的有源负载,可以在设置合适的静态工作点的同时,抑制共模信号;同时将单端输出时的差模电压放大倍数提高了近两倍,不再是普通的差分放大电路的二分之一;而且动态电流全部流向负载,没有分配给集电极电阻;

由于集成运放的内部经常第一级为差分放大电阻,通过单端输出连接后级电路,因此,经常见到的结构是类似左图中的带有镜像电流源作为有源负载和偏置恒流源取代长尾电阻的差分放大电路(当然,也可以用镜像电流源取代长尾电阻,作用相同)

在后面的复杂电路识图过程中,要能够识别出恒流源结构以及其作用;

电流源电路 —— 小结

- ○典型的电流源 —— 镜像电流源、比例电流源、微电流源以及其他派生电流源的结构特点 以及原理分析;
- ○电流源电路是集成运放内部非常重要的单元电路,其静态时可以为电路提供静态电流,设置合适的静态工作点,在一定的电压和电流下等效为一个较小的静态电阻;而动态分析中其等效为一个近似无穷大的动态电阻,常见应用例如作为放大电路的有源负载、取代差分放大电路的长尾电阻、可以提高差分放大电路的共模抑制能力和差模放大能力、功率放大电路(互补输出级)中设定静态工作点代替偏置电阻(回顾功放电路);
- ○在后面的复杂多级电路的分析中(例如集成运放内部识图),要能够识别分离出其中的电流源电路及分析其作用;