



模拟电子技术

学习情境四 差动放大电路与集成运算放大器

第一单元 差动放大电路

情境导入

市场上的电子报警器种类繁多，它们的工作原理是什么？电子报警器包括整流滤波电路、稳压电路、放大电路、比较器、发光二极管驱动电路、二极管开关、晶体管开关、RC振荡电路等。采用不同的传感器，可以制作出不同的报警器，如温度报警器、压力报警器、红外线报警器、可燃气体报警器、烟雾报警器等。传感器对外界信息进行检测，配合传感器外接电路，将外界信息的变化转换成电压信号，该信号经过放大电路放大后，得到一个较大的电压变化。将其输入到电压比较器中和参考电压进行比较，比较器的输出结果有两种（高电平或低电平），以此来控制报警电路工作。

学习导航

- 1.掌握差动放大电路的组成和工作原理；掌握差动放大电路的输入、输出方式及参数计算。
- 2.熟悉常见的几种恒流源形式及其主要应用；掌握电流源电路结构、基本特性、 I_o 和 I_R 的计算；了解恒流源式差动放大电路的优点。
- 3.了解集成运算放大器的基本结构、图形符号和主要性能指标；掌握理想集成运算放大器的性能指标及传输特性。
- 4.掌握集成运算放大器的应用电路。

育人目标

了解我国科学家在集成电路制造技术上的研究成果，激发学生科技报国的家国情怀和使命担当。

知识目标

- 1.掌握差动放大电路的电路结构，输入、输出方式，以及参数计算。
- 2.掌握常见的几种恒流源电路结构、基本特性、参数计算及主要应用。
- 3.了解恒流源式差动放大电路的优点。

技能目标

通过本单元的学习，重点掌握差动放大电路的测试，以及全天候太阳能自动跟踪控制器电路的制作。

基础知识

一、差动放大电路的基本特性

(一) 差动放大电路的结构

图4-1所示为基本差动放大电路。电路是以晶体管 T_1 、 T_2 为核心组成的共发射极放大电路，两个管子的特性和参数相同，电路的结构对称，对应的参数相同，因此静态工作点也相同。输入信号分别从两管的基极与地之间加入，输出信号从两管的集电极之间取出，如图4-2所示。

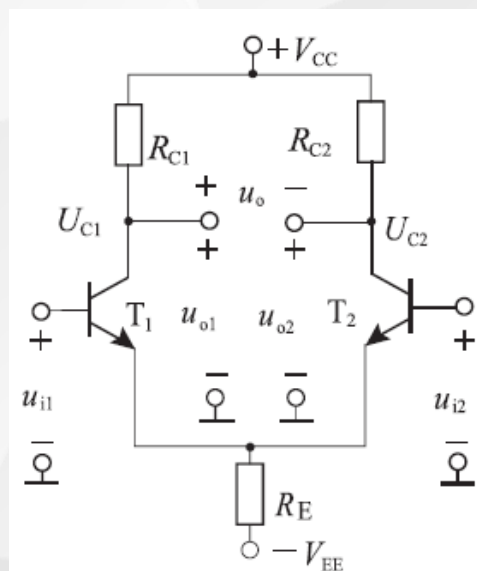


图 4-1 基本差动放大电路

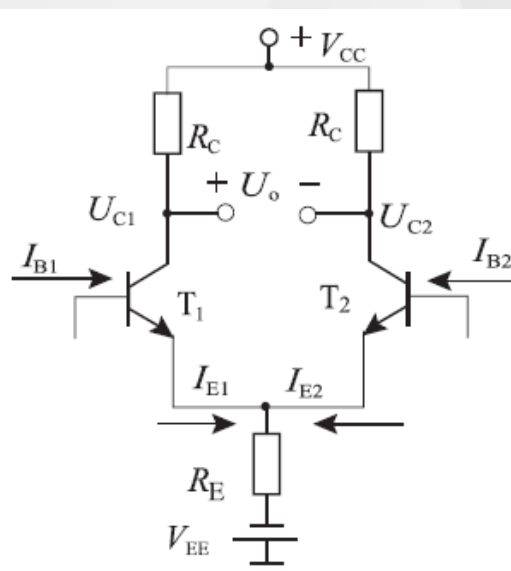


图 4-2 基本差动放大电路的直流通路

(二) 抑制零点漂移的原理

由于两管特性相同，所以当温度或其他外界条件发生变化时，两管的集电极电流 I_{C1} 和 I_{C2} 的变化规律始终相同，结果使两管的集电极电位 V_{C1} 、 V_{C2} 始终相等，从而使 $U_o = V_{C1} - V_{C2} = 0$ ，因此消除了零点漂移。

(三) 信号输入方式

差动放大电路的信号输入有以下几种情况。

(1) 差模输入。两个输入信号大小相等、极性相反，称为差模信号，即 $U_{i1} = -U_{i2}$ 。此时两管各自的输出电压也是大小相等、极性相反，即 $U_{o2} = -U_{o1}$ ，故有 $U_o = U_{o1} - U_{o2} = 2U_{o1}$ 。差模输出电压是每管输出电压的两倍，可以实现差模电压放大。差模输入信号是两个输入信号之差，常用 U_{id} 来表示。

差动放大电路在差模输入时，输出电压 U_{od} 与输入电压 U_{id} 之比称为差模电压放大倍数，用 A_d 表示，即

$$A_d = \frac{U_{od}}{U_{id}} \quad (4-1)$$

第一单元 差动放大电路

(2) **共模输入**。如图4-3所示，两个输入信号大小相等、极性相同，称为共模信号，即 $u_{i1}=u_{i2}$ 。此时，两管的输出电压也是大小相等，极性相同，即 $u_{o2}=u_{o1}$ ，故有 $u_o=u_{o1}-u_{o2}=0$ 。共模输出电压为零，因此在理想对称的情况下，差动放大电路对共模输入信号没有放大作用。共模输入信号常用 u_{ic} 表示。

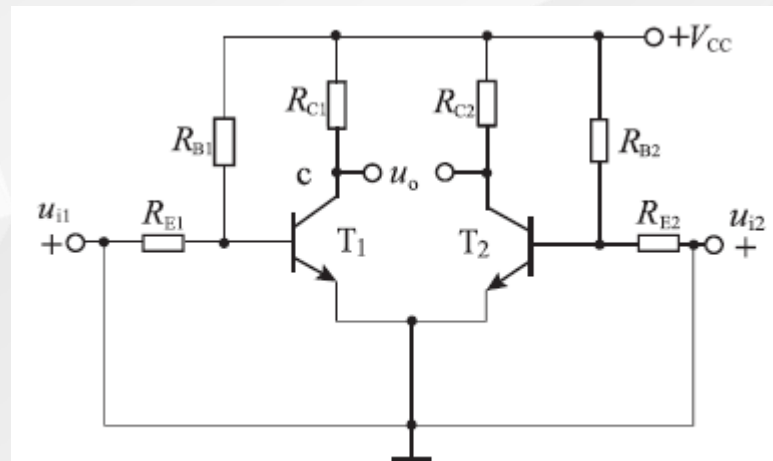


图 4-3 共模输入差动放大电路

在共模输入时，输出电压 u_{oc} 与共模输入电压 u_{ic} 之比称为共模电压放大倍数，用 A_c 表示，即

$$A_c = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} \quad (4-2)$$

(3) 任意输入。两个输入信号大小和极性是任意的，为了便于分析，可将它们分解为一对差模信号与一对共模信号的和。分解方法：两个输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 的差模输入分量 u_{id} 和共模输入分量 u_{ic} 分别为

$$u_{id} = (u_{i1} - u_{i2}) \quad (4-3)$$

$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) \quad (4-4)$$

$$\begin{cases} u_{i1} = u_{ic} + \frac{1}{2}u_{id} \\ u_{i2} = u_{ic} - \frac{1}{2}u_{id} \end{cases} \quad (4-5)$$

(四) 静态分析

基本差动放大电路的直流通路如图4-2所示。由于电路对称， $I_{E1}=I_{E2}=I_{E3}$ ，所以

$$V_{EE} = U_{BE} + 2I_E R_E$$
$$I_E = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2R_E} \approx I_C \quad (4-6)$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (4-7)$$

$$U_{CE} = U_{CE1} = U_{CE2} = V_{CC} + V_{EE} - I_C R_C - 2I_E R_E \quad (4-8)$$

由于 $U_{C1}=U_{C2}$ ，所以 $U_o=U_{C1}-U_{C2}=0$ 。

由此可知，输入信号为零时，基本差动放大电路的输出电压也为零。

二、差动放大电路的输入、输出方式

差动放大电路共有四种输入、输出的连接方式，分别是双端输入、双端输出，双端输入、单端输出，单端输入、单端输出，以及单端输入、双端输出。

(一) 双端输入、双端输出电路（双入双出）

图4-4所示电路为双端输入、双端输出差动放大电路。

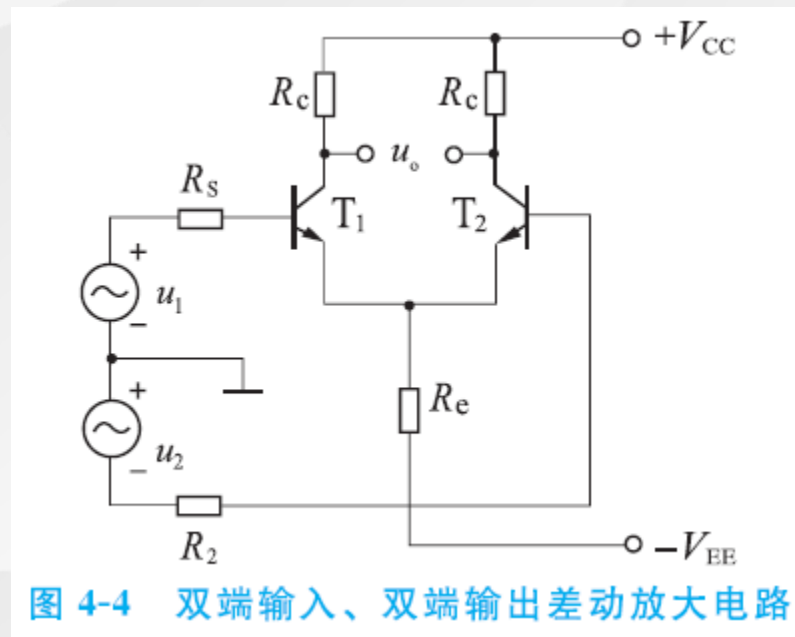


图 4-4 双端输入、双端输出差动放大电路

第一单元 差动放大电路

该电路的各参数如下。

差模电压放大倍数 A_d 为

$$A_d = -\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_S + r_{be}} \quad (4-9)$$

共模电压放大倍数 A_c 为

$$A_c = 0 \quad (4-10)$$

共模抑制比 K_{CMRR} 为

$$K_{CMRR} \rightarrow \infty \quad (4-11)$$

差模输入电阻 R_{id} 为

$$R_{id} = 2(R_S + r_{be}) \quad (4-12)$$

输出电阻 R_o 为

$$R_o = 2R_c \quad (4-13)$$

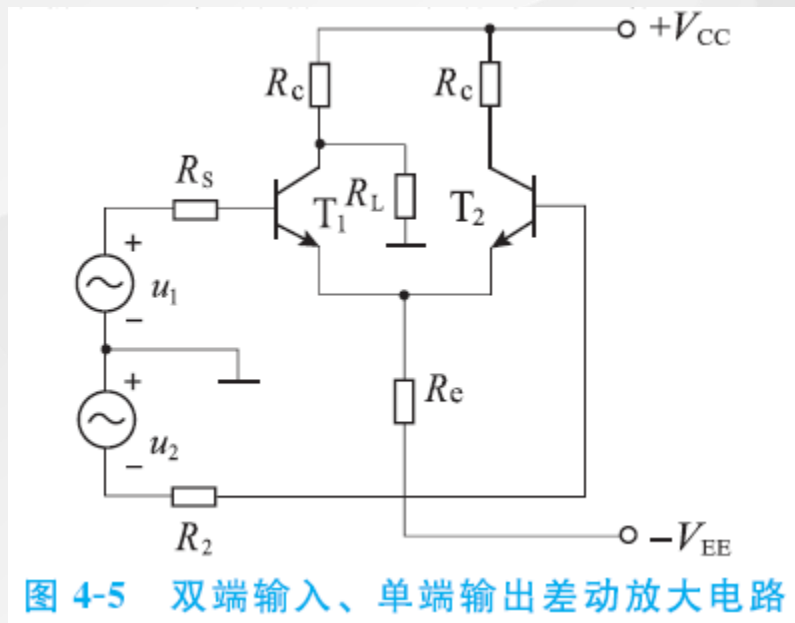
可见双端输入、双端输出差动放大电路的差模电压放大倍数与单管放大电路的电压放大倍数相同。

此电路适用于输入、输出均无须接地，对称输入、对称输出的场合。

第一单元 差动放大电路

(二) 双端输入、单端输出电路 (双入单出)

图4-5所示电路为双端输入、单端输出差动放大电路。



第一单元 差动放大电路

差模电压放大倍数 A_d 为

$$A_d = \frac{\beta(R_c // R_L)}{2(R_S + r_{be})} \quad (4-14)$$

共模电压放大倍数 A_c 为

$$A_c \approx \frac{R_c // R_L}{2R_e} \quad (4-15)$$

共模抑制比 K_{CMRR} 为

$$K_{CMRR} \approx \frac{\beta R_e}{R_S + r_{be}} \quad (4-16)$$

差模输入电阻 R_{id} 为

$$R_{id} = 2(R_S + r_{be}) \quad (4-17)$$

输出电阻 R_o 为

$$R_o = R_c \quad (4-18)$$

通过上面的参数可看出，双端输入、单端输出差动放大电路的差模电压放大倍数为单管放大电路的电压放大倍数的一半。该电路常用于将差动双端输入信号转换为单端输出信号的场合。

第一单元 差动放大电路

(三) 单端输入、双端输出电路 (单入双出)

当忽略电路对共模信号的放大作用时，单端输入就可等效为双端输入的情况，所以双端输入、双端输出的各参数的结论均适合单端输入、双端输出差动放大电路，如图4-6所示。

这种接法的电路的特点是可以把单端输入转换成双端输入，作为下一级的差动输入。**这种电路适用于负载两端的任何一端均不接地的场合。**

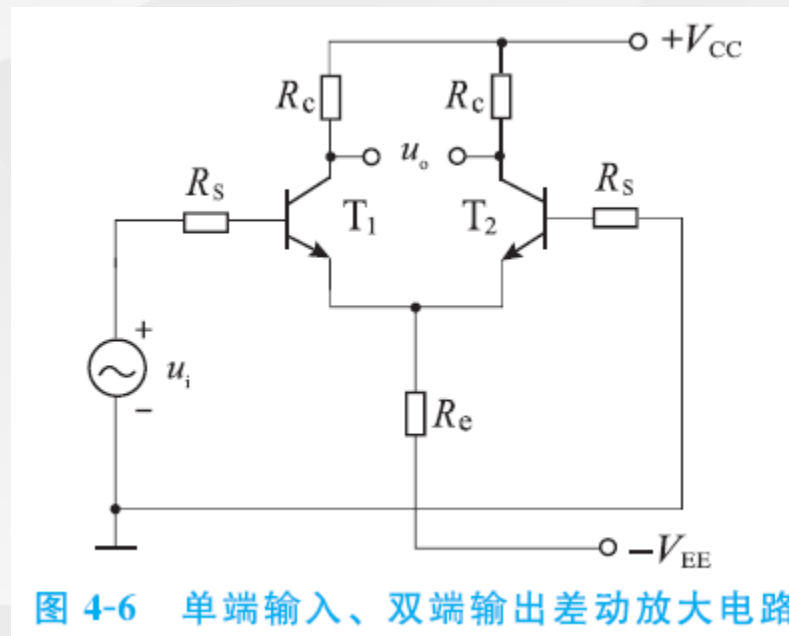


图 4-6 单端输入、双端输出差动放大电路

(四) 单端输入、单端输出电路 (单入单出)

图4-7所示电路为单端输入、单端输出差动放大电路。

按前面同样的方法可以得出它与双端输入、单端输出等效，各参数的计算方法相同。该电路差模电压放大倍数为单管放大电路电压放大倍数的一半，但相比单管放大电路而言，其具有较强的抑制零点漂移的能力，而且通过改变输出端的不同接法，可以得到输入、输出间的同相、反相关系。该电路适用于输入、输出均要求接地的场合。

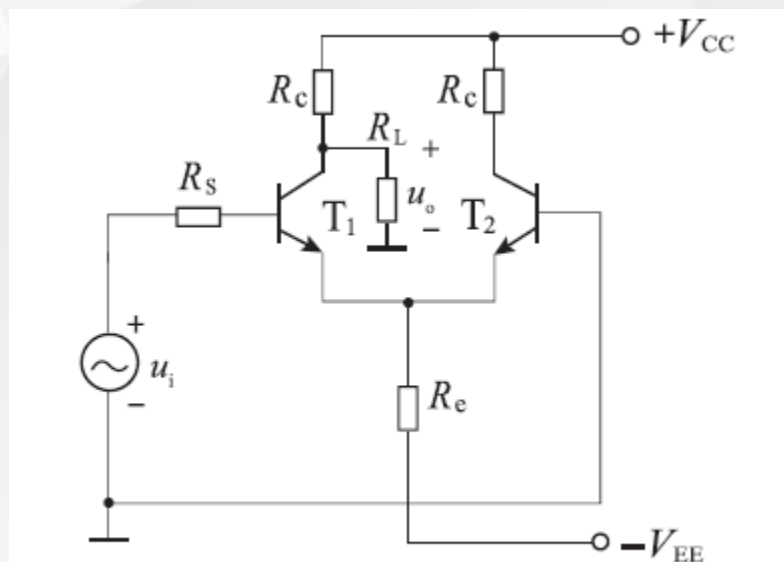


图 4-7 单端输入、单端输出差动放大电路

第一单元 差动放大电路

通过前面的分析可以看出，差动放大电路的主要性能指标仅与输出方式有关，而与输入方式无关。

不论是单端输入还是双端输入，只要输出是双端的，其差模电压放大倍数就与单管放大电路的电压放大倍数相同；同样，无论是单端输入还是双端输入，只要输出是单端的，其差模电压放大倍数就是单管放大电路电压放大倍数的一半。

课堂讨论：

差动放大电路的主要性能指标有电压放大倍数、输入电阻和输出电阻，试从这三方面比较四种差动放大电路。

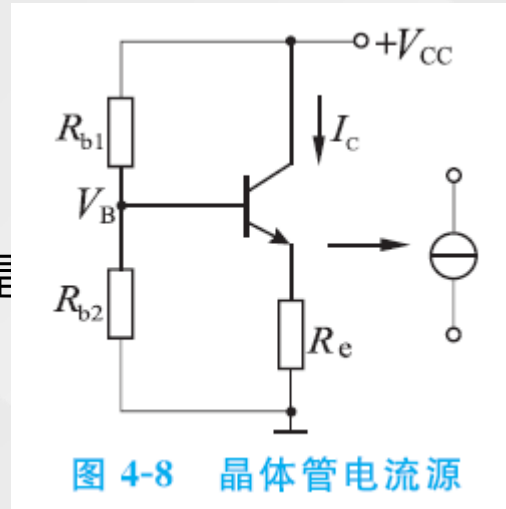
三、恒流源电路

(一) 晶体管电流源

电流源是模拟集成电路中广泛使用的一种单元电路。对电流源的主要要求是

- ①能输出符合要求的直流电流 I_o ；
- ②直流等效电阻很小；
- ③交流等效电阻尽可能大。

如图4-8所示，晶体管电流源由 V_{CC} 、 R_{b1} 、 R_{b2} 和 R_e 组成，当 V_{CC} 、 R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e 确定之后，基极电位 V_B 固定（ I_B 一定），可以推知 I_C 基本恒定。从晶体管的输出特性曲线可以看出：晶体管工作在放大区时， I_C 具有近似恒流的性质。



(二) MOS管电流源

MOS管电流源如图4-9所示,其交流等效电路如图4-10所示。

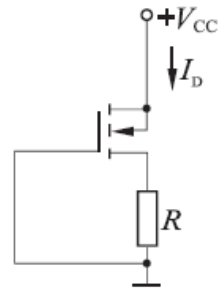


图 4-9 MOS 管电流源

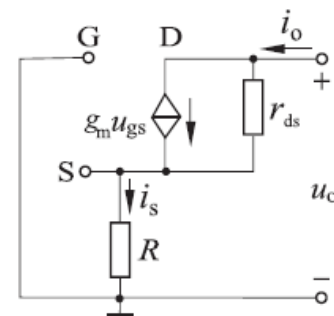


图 4-10 交流等效电路

由图 4-10 得

$$\begin{cases} i_s = i_o \\ u_{gs} = -i_s R \\ (i_s - g_m u_{gs}) r_{ds} + i_s R = u_o \end{cases}$$

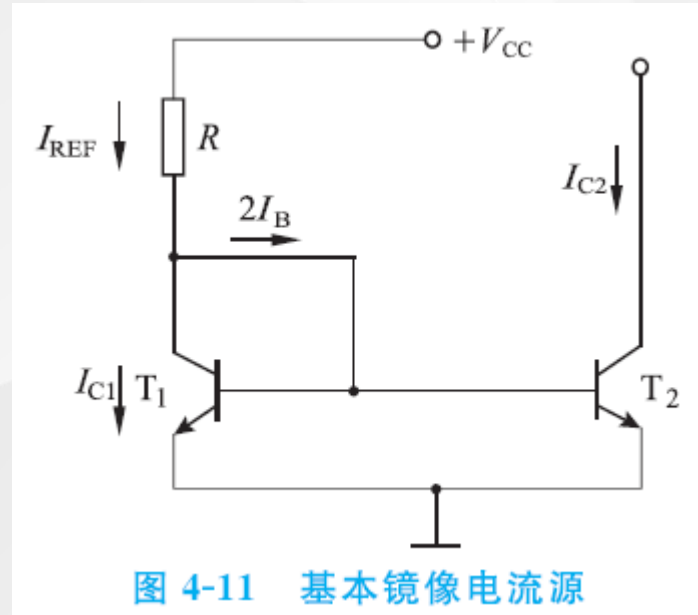
则

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} = R + (1 + g_m R) r_{ds} \approx (1 + g_m R) r_{ds}$$

在分立元件电路和某些模拟集成电路中，常用结型场效应管（JFET）接成的电流源。

(三) 基本镜像电流源

基本镜像电流源如图4-11所示。



T_1 、 T_2 参数完全相同（即 $\beta_1=\beta_2$ ， $I_{CEO1}=I_{CEO2}$ ），因为 $U_{BE1}=U_{BE2}$ ，所以 $I_{C1}=I_{C2}$ ，则基准电流 I_{REF} 为

$$I_{REF} = I_{C1} + 2I_B = I_{C1} + 2 \frac{I_{C1}}{\beta}$$

由 $I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + 2/\beta} = I_{C2}$ 可知，当 $\beta \gg 2$ 时， $I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF} \approx \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R} \approx \frac{V_{CC}}{R}$ 。

第一单元 差动放大电路

基本镜像电流源的优点是：

(1) $I_{C2} \approx I_{REF}$ ，即 I_{C2} 不仅由 I_{REF} 确定，且总与 I_{REF} 相等。

(2) T_1 对 T_2 具有温度补偿作用， I_{C2} 温度稳定性好（设温度升高使 I_{C2} 增大，但 I_{C1} 增大，而 I_{REF} 一定，因此 I_B 减少，使 I_{C2} 减少，保持稳定）。

基本镜像电流源的缺点是：

(1) I_{REF} （即 I_{C2} ）受电源变化的影响大，故要求电源十分稳定。

(2) 适用于较大工作电流（mA数量级）的场合。因为要使 I_{C2} 下降，就必须增大 R ，而在集成电路中制作大阻值电阻需要占用较大的硅片面积。

(3) 交流等效电阻 R_o 不够大，恒流特性不理想。

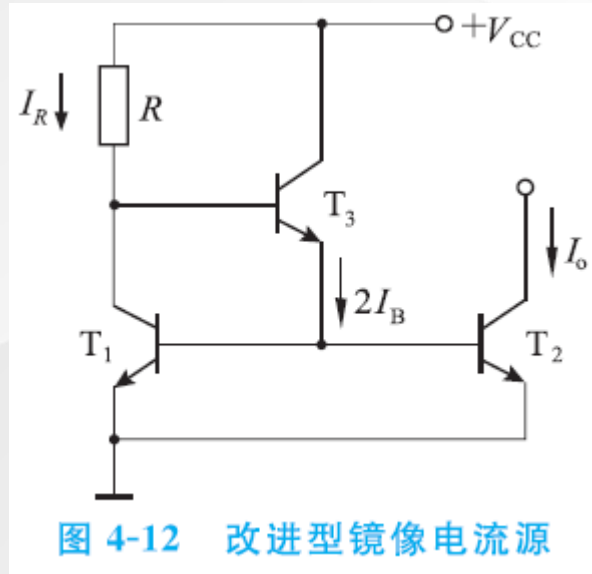
(4) I_{C2} 与 I_{REF} 的镜像精度取决于 β 。当 β 较小时， I_{C2} 与 I_{REF} 的差别不能忽略。

课堂讨论：

电流源可以用作放大电路的集电极电阻吗？

(四) 改进型镜像电流源

改进型镜像电流源如图4-12所示。



改进型镜像电流源是针对基本镜像电流源缺点（4）进行的改进。两者的不同之处在于，改进型镜像电流源增加了晶体管 T_3 ，其目的是减少晶体管 T_1 、 T_2 的 I_B 对 I_R 的分流作用，提高镜像精度，减少 β 值不够大带来的影响。

$$\begin{aligned} I_R &= I_{C1} + I_{B3} = \beta_1 I_{B1} + I_{B3} = \beta I_{B1} + \frac{I_{E3}}{\beta_3 + 1} \\ &= \beta_1 I_B + \frac{2I_B}{\beta_3 + 1} = I_B \left(\beta_1 + \frac{2}{\beta_3 + 1} \right) \\ &= I_B \cdot \frac{\beta_1(\beta_3 + 1) + 2}{\beta_3 + 1} = \frac{\beta_1(\beta_3 + 1) + 2}{\beta_3 + 1} \cdot \frac{I_{C2}}{\beta_1} \end{aligned}$$

所以

$$I_{C2} = \frac{\beta_1(\beta_3 + 1)}{\beta_1(\beta_3 + 1) + 2} I_R \approx I_R$$

此时镜像成立的条件为 $\beta_1(\beta_3 + 1) \gg 2$ ，比较容易满足。或者说，要保持同样的镜像精度，允许晶体管的 β 值相对低些。

(五) 比例电流源

比例电流源如图4-13所示

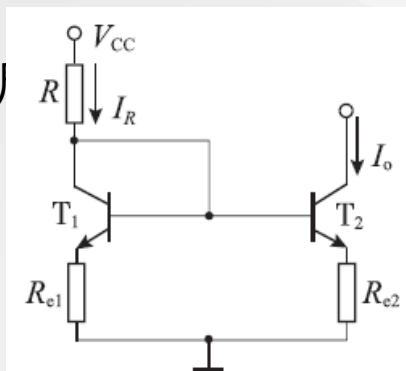


图 4-13 比例电流源

比例电流源是带有发射极电阻的镜像电流源，它是针对基本镜像电流源的缺点（3）进行的改进，其中 $R_{e1}=R_{e2}$ ，两管输入仍有对称性，所以

$$I_o = \frac{1}{1+2/\beta} I_R$$

$$I_R R + U_{BE} + I_{E1} R_{e1} = V_{CC}$$

$$I_R \approx \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R + R_{e1}} \neq I_o$$

由 $\begin{cases} u_o = (i_o - \beta i_b) r_{ce} + i_e R_{e2} \\ R_B = R // (R_{e1} + r_D) \approx R // R_{e1} \\ i_b (R_B + r_{be}) + i_e R_{e2} = 0 \\ i_e = i_b + i_o \end{cases}$ 可得 T_2 的输出电阻为

$$R_o = r_{ce} + R_{e2} + \frac{R_{e2}}{r_{be} + R_B + R_{e2}} (\beta r_{ce} - R_{e2})$$

$$\approx r_{ce} \left(1 + \frac{\beta R_{e2}}{r_{be} + R_B + R_{e2}} \right)$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/978014006142007011>