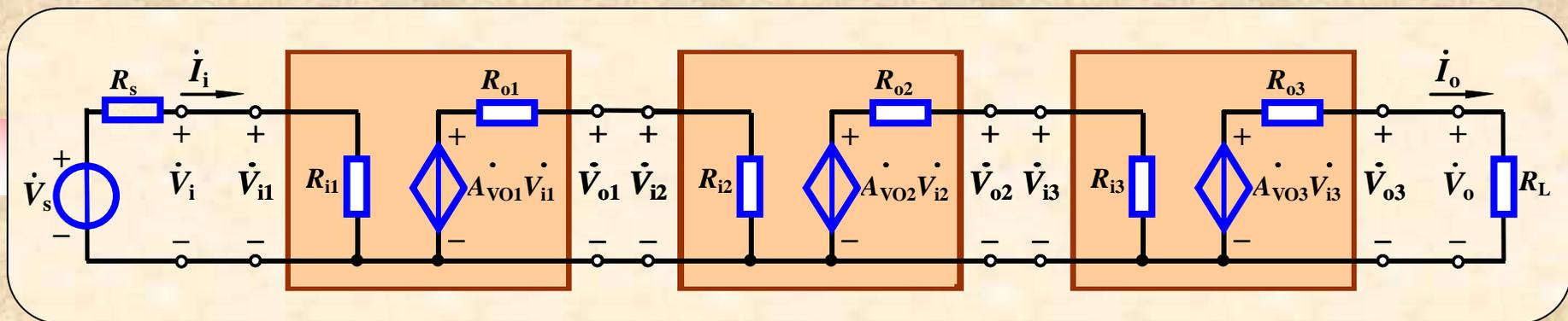


多级放大电路



输入级— $R_i \uparrow$

共集、共射

中间放大级— $A_v \uparrow$

共射、共基

输出级— $R_o \downarrow$

共集

$R_i \uparrow$

2个信号相减
直接耦合
零漂

R_L 特别小

第4章
场效应管

第6.2节
差分放大电路

第6.1节
电流源

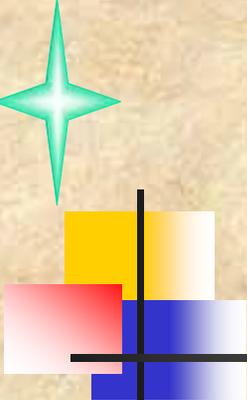
第5章
功率放大电路

第8、9、10章
运算放大器应用
各种功能电路

第6章
集成运算放大器

性能改善

第7章
反馈技术、方法



6 集成电路运算放大器



- 6.1 集成电路运算放大器中的电流源
- 6.2 差分式放大电路
- 6.3 集成电路运算放大器
- 6.4 集成电路运算放大器的主要参数
- *6.5 专用型集成电路运算放大器
- *6.6 放大电路中的噪声与干扰

6.1 集成电路运算放大器中的 电流源

- 概述
- BJT基本电流源
- 比例电流源
- 镜像电流源
- 微电流源
- 多路电流源
- 电流源用作有源负载

学习要求

能辨认电路（电流源结构的变化规律）

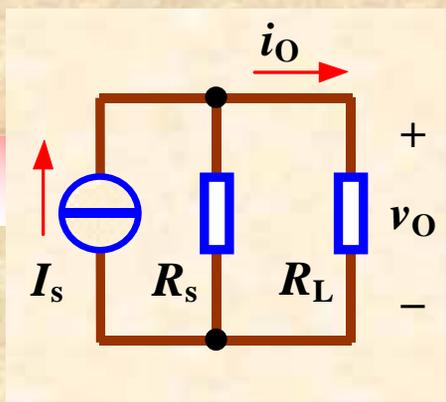
会计算电流源的输出电流（求 Q ）

6.1 集成电路运算放大器中的电流源

1. 概述

恒流源： $R_s = \infty$ ， $i_O = I_s$ ，与 R_L 无关

三极管工作在放大区，其输出特性具有恒流特性。



特点：易受温度影响

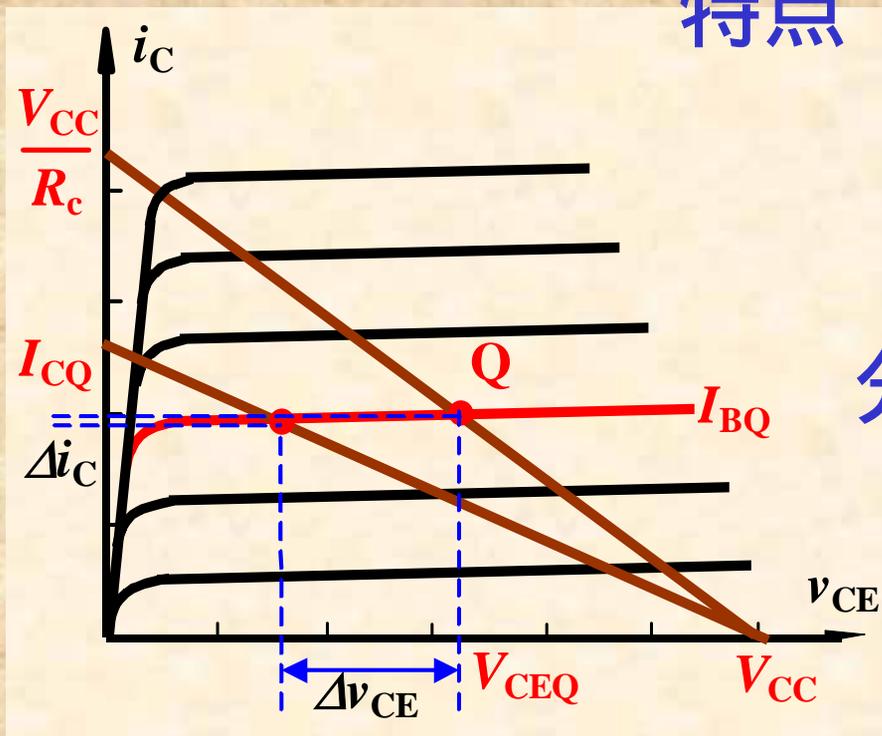
直流电阻小

交流电阻大

$$R_{CE} = \frac{V_{CE}}{I_C}$$
$$r_{ce} = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta i_C}$$

分析任务

确定电流源的输出电流，
并提高计算精度
提高输出电阻 R_o



6.1 集成电路运算放大器中的电流源

2. BJT基本电流源

——分压式射极偏置电路

在满足条件 $I_1 \gg I_B$; $V_B \gg V_{BE}$ 时

$$V_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

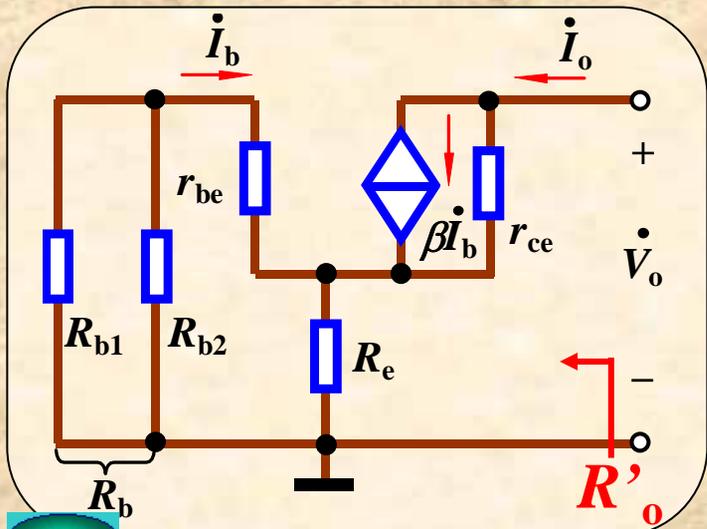
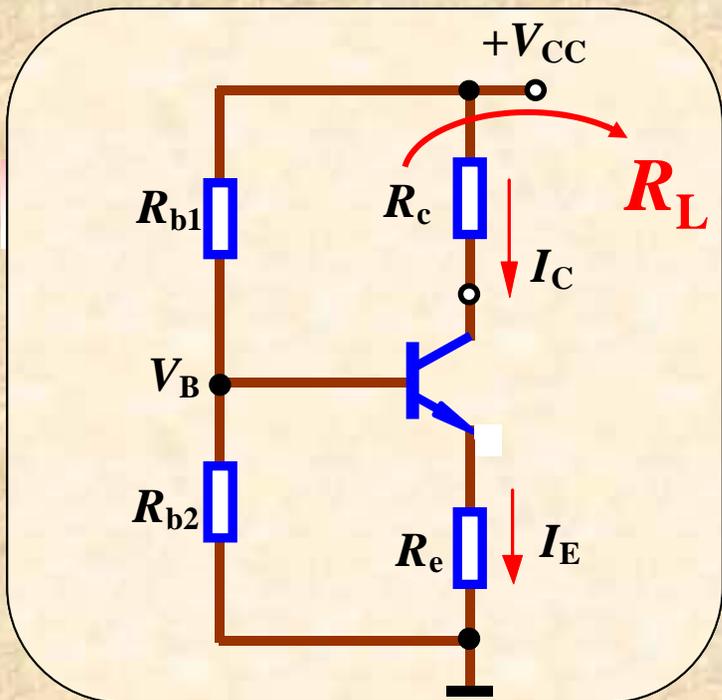
$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_e} \approx \frac{V_B}{R_e} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot \frac{V_{CC}}{R_e}$$

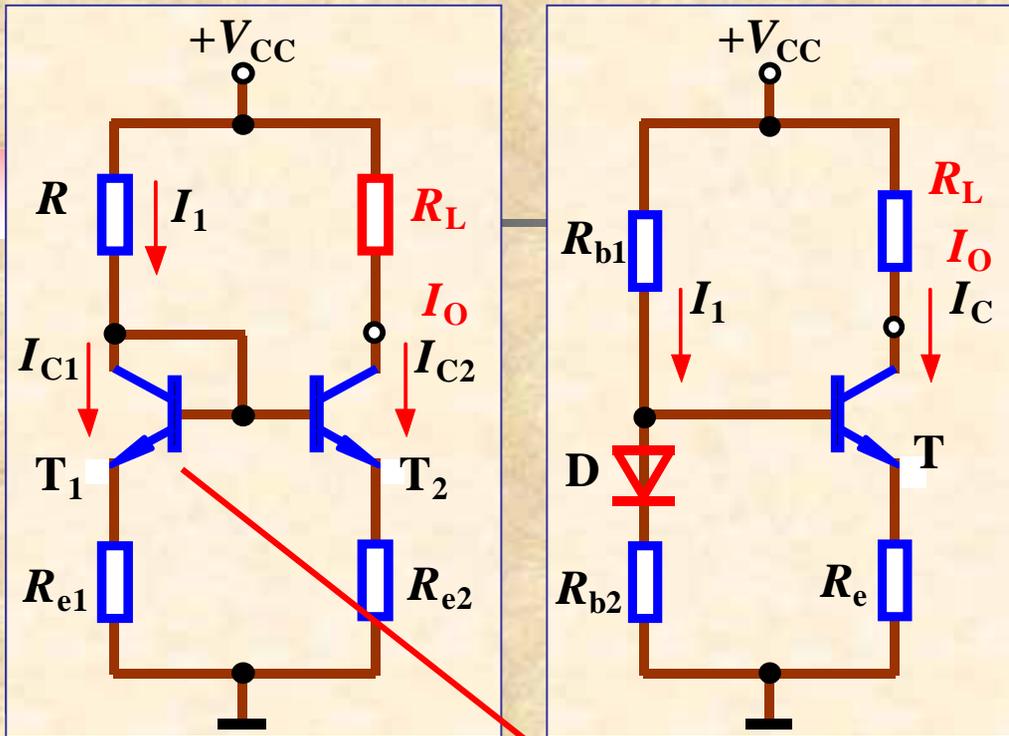
与 R_c 无关，且能稳定Q（温度影响）

电流源内阻 $R_s = R'_o$ （输出电阻）

$$R'_o = r_{ce} \left(1 + \frac{\beta \cdot R_e}{r_{be} + R_b + R_e} \right)$$

式3.5.6（106页）





思路：

提高计算精度

- 增加1个二极管D
并使D与T (Je) 具有相同的温度特性 (补偿)

即： $V_D = V_{BE}$

所以，在Je回路有：

$$V_D + I_1 R_{b2} = V_{BE} + I_C R_e$$

$$I_C = I_1 \frac{R_{b2}}{R_e} \quad \text{比例电流源}$$

而： $I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{b1} + R_{b2}} \approx \frac{V_{CC}}{R_{b1} + R_{b2}}$

BJT基本电流源

满足条件： $I_1 \gg I_B$

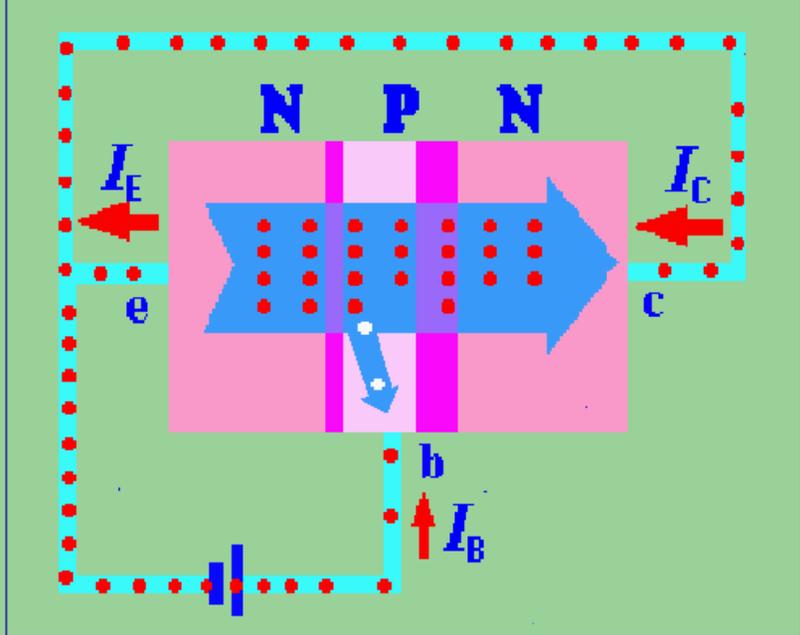
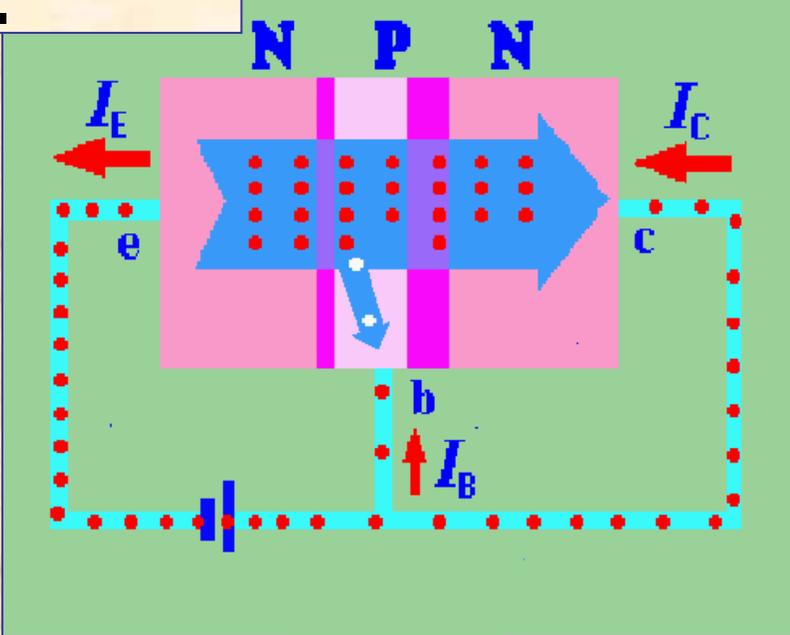
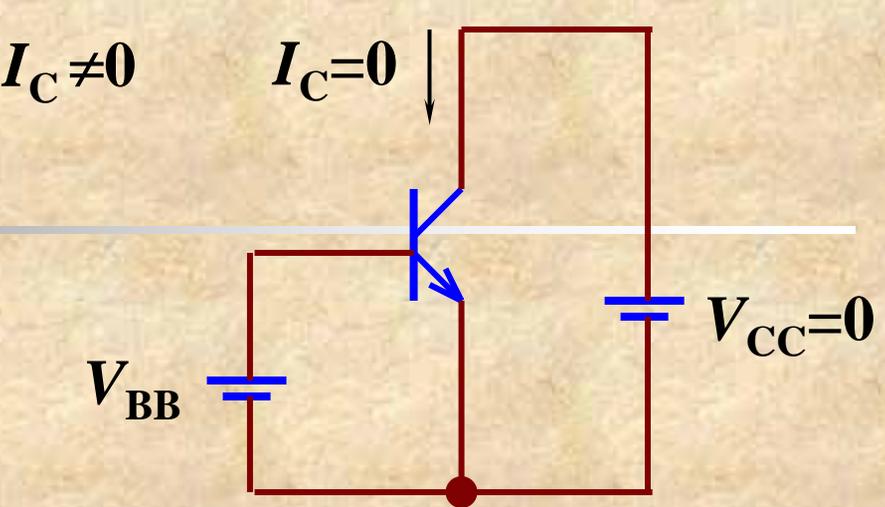
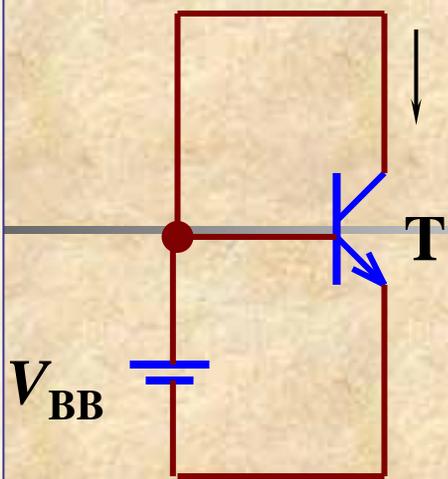
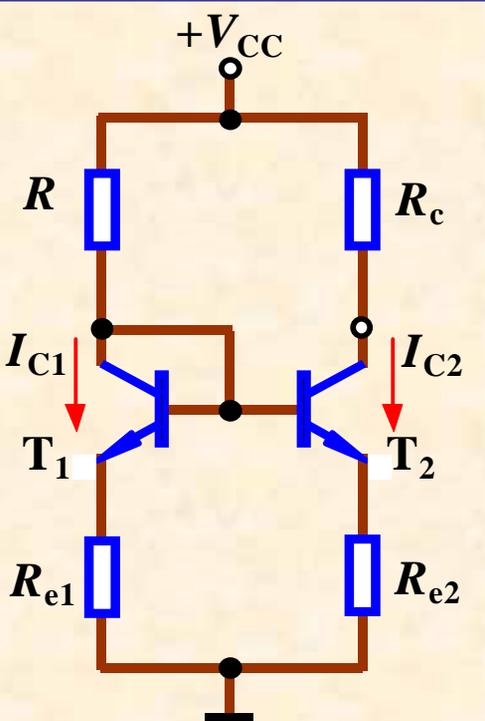
$$V_B \gg V_{BE}$$

$$I_C \approx \frac{V_B - V_{BE}}{R_e} \approx \frac{V_B}{R_e}$$

特殊状态

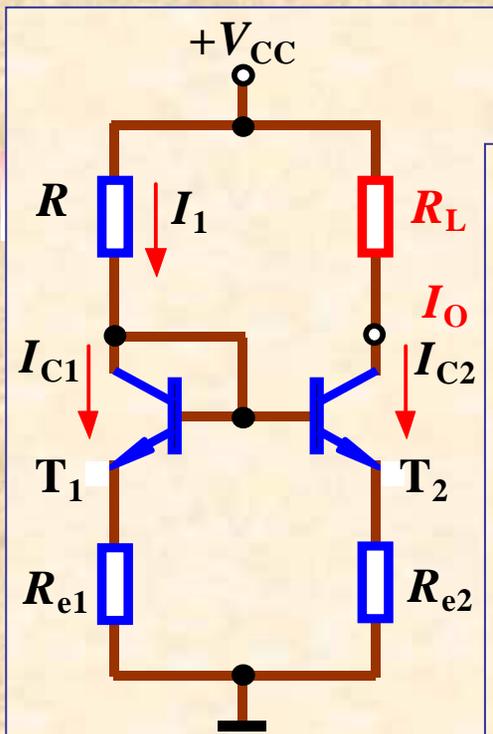
集成电路中，D→T1

BJT电流源接法与放大电路接法比较

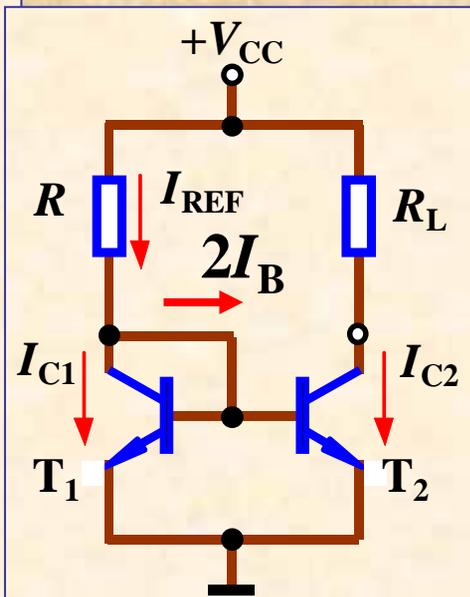


6.1 集成电路运算放大器中的电流源

4. 镜像电流源



比例电流源



思路：比例系数 = 1

去掉2个电阻，减少占用硅片面积

求 $I_{C2} = ?$

假设 T_1 处于放大区 (问题?)

对管 T_1 与 T_2 特性相同 (温度补偿)

$$\therefore V_{BE2} = V_{BE1} ; \beta_2 = \beta_1$$

$$\therefore I_{B2} = I_{B1} ; I_{C2} = I_{C1}$$

对 T_1 的C点列KCL方程：

$$I_{C2} = I_1 \frac{R_{e1}}{R_{e2}} = \frac{R_{e1}}{R_{e2}} \cdot \frac{V_{CC}}{R + R_{e1}}$$

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

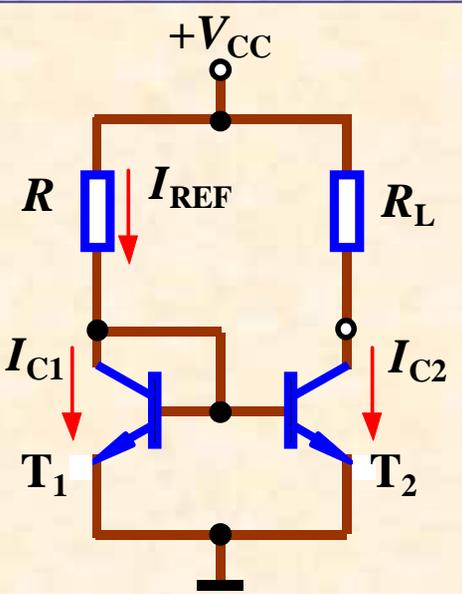
镜像

$$I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R} \approx \frac{V_{CC}}{R}$$

$$R_o = r_{ce2}$$

6.1 集成电路运算放大器中的电流源

4. 镜像电流源 思路：提高精度



$$I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_{REF} \approx \frac{V_{CC}}{R}$$

问题1

问题2

↳ $V_{CE1} = V_{BE1} \approx 0.6V \neq V_{CE2}$

虽有： $V_{BE2} = V_{BE1}$; $\beta_2 = \beta_1$ 但仍造成： $I_{C2} \neq I_{C1}$

修正如下：考虑基区宽度调制效应（75页）

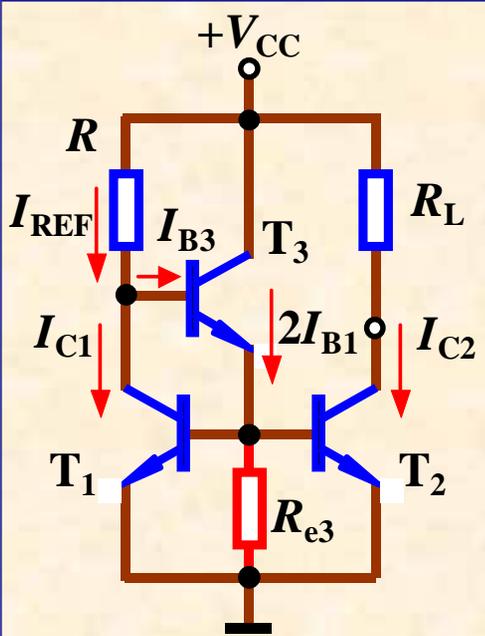
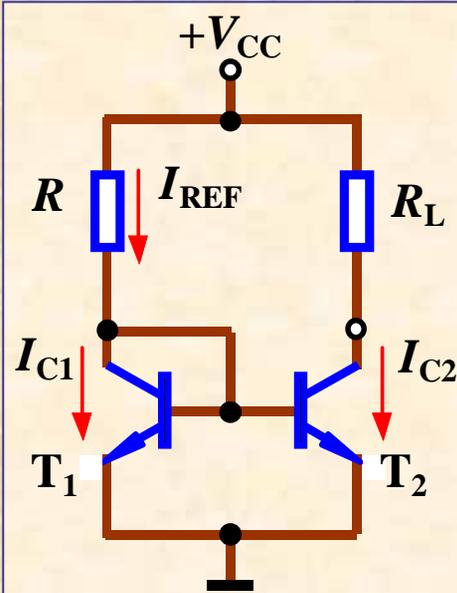
$$r_{ce} = \frac{V_A}{I_C}$$

(V_A 为Early电压，典型值 100V)

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$\frac{I_{C2}}{I_{C1}} = \frac{1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}}{1 + \frac{V_{CE1}}{V_A}} = \frac{1 + \frac{30}{100}}{1 + \frac{0.6}{100}} \approx 1.29$$

6.1 集成电路运算放大器中的电流源



4. 镜像电流源 $R_o = r_{ce2}$

思路：提高精度

解决方法：增加1个缓冲级 T_3 即共集放大器，减小分流。

带缓冲级的镜像电流源

同样对 T_1 的C点列KCL方程：

$$I_{C1} = I_{REF} - I_{B3} = I_{REF} - \frac{2I_{B1}}{\beta}$$

$$I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta^2}} \approx I_{REF}$$

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE1}}{R} \approx \frac{V_{CC}}{R}$$

$$I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_{REF} \approx \frac{V_{CC}}{R}$$

问题2

若 β 较小，则分流造成的误差不能忽略！

为了避免 T_3 的电流过小而使 β_3 下降，常常加入电阻 R_{e3} ，使 I_{E3} 增

6.1 集成电路运算放大器中的电流源

5. 微电流源

思路：产生 μA 级电流

例如： $V_{CC} = 10\text{V}$ ， $I_{C2} = 1\mu\text{A}$ ，
则 $R = 10\text{M}\Omega$ 。需占用硅片面积大

解决方法：。。。

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}} = \frac{\Delta V_{BE}}{R_{e2}} \left(\frac{10\text{mV}}{10\text{k}\Omega} \right)$$

$$I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + 2/\beta} \approx I_{REF}$$

计算方法：

$$I_E \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$\therefore I_{C2} \approx \frac{V_T}{R_{e2}} \ln \frac{I_{REF}}{I_{C2}} \quad (1)$$

$$I_{REF} \approx \frac{V_{CC}}{R} \quad (2)$$

$$v_{BE} \approx V_T \ln \frac{I_E}{I_S}$$

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}} \approx \frac{V_T}{R_{e2}} \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}}$$

例：已知 $V_{CC} = 15\text{V}$ ， $I_R = 1\text{mA}$ ，
 $I_{C2} = 20\mu\text{A}$ ， $V_{BE1} = 0.7\text{V}$ ，则由(2)得
 $R = 15\text{k}\Omega$ ；由(1)得 $R_{e2} = 5\text{k}\Omega$ 。

6.1 集成电路运算放大器中的电流源

6. 多路电流源

带缓冲级的比例电流源

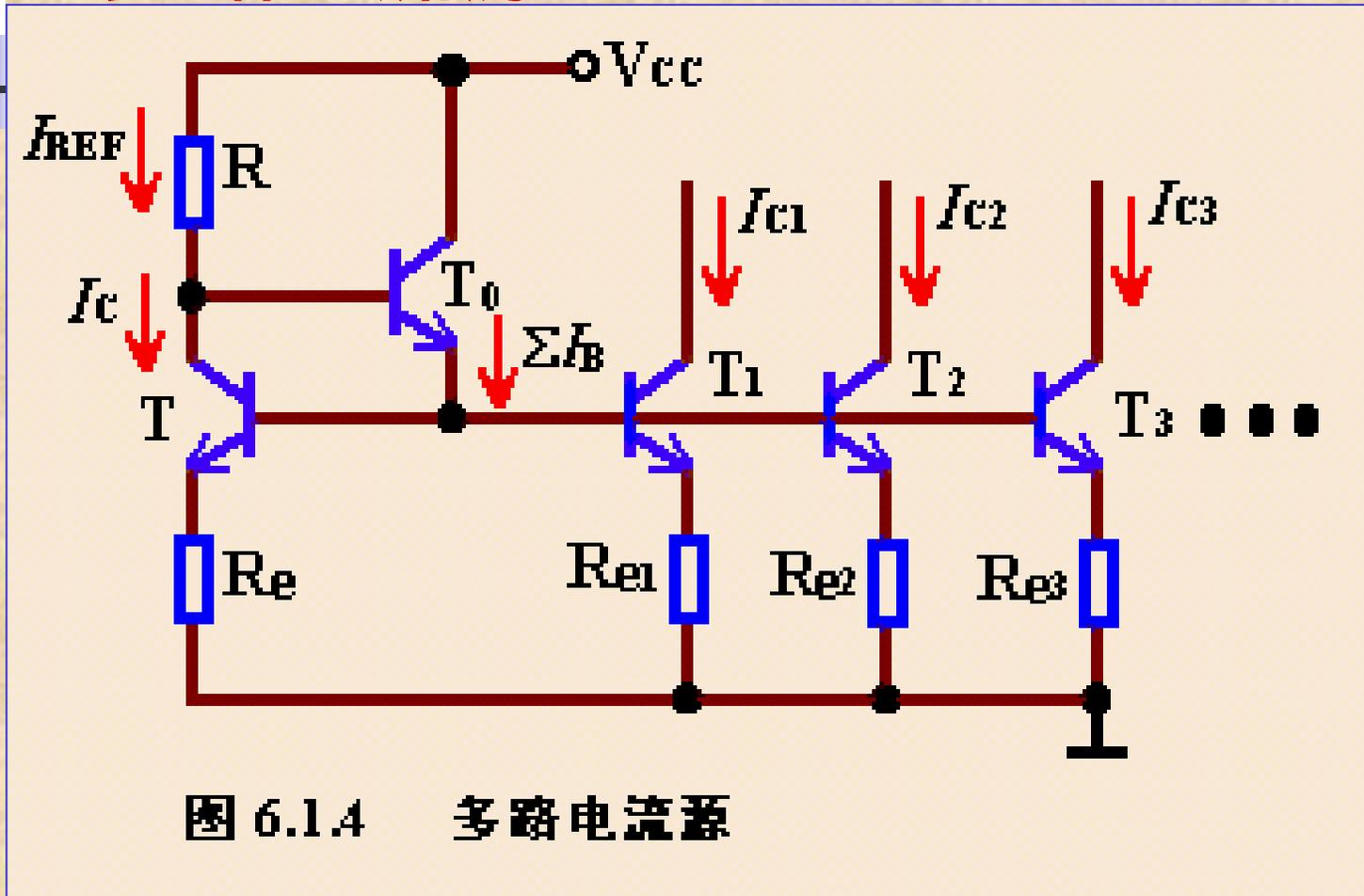
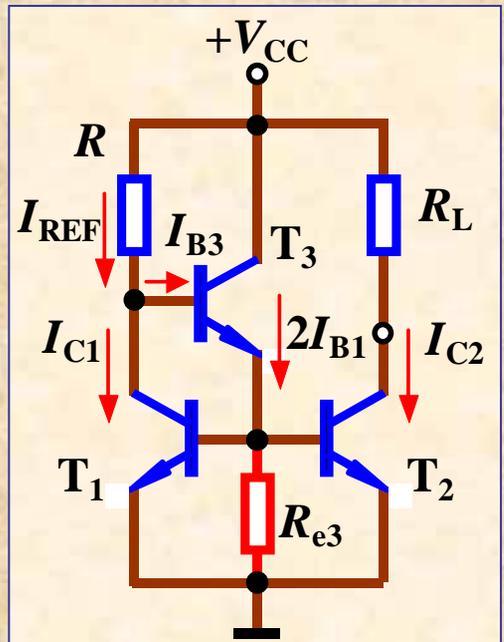
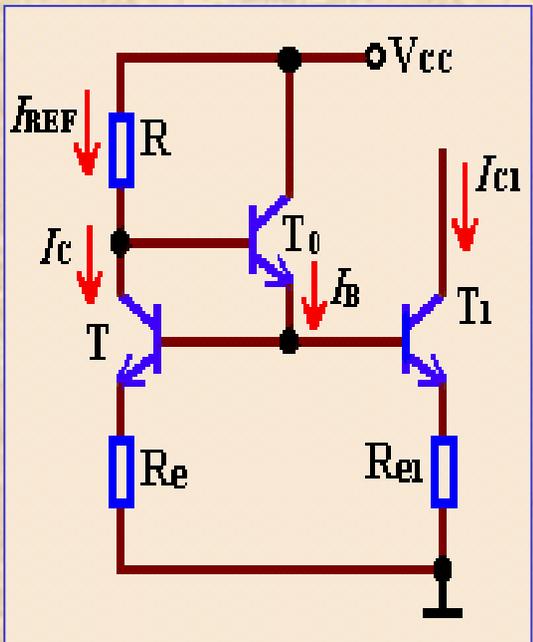
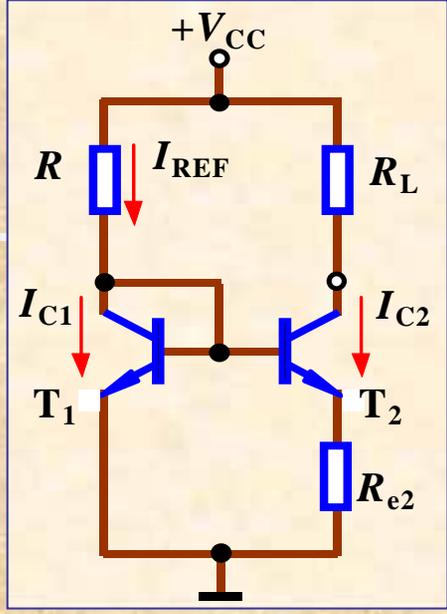
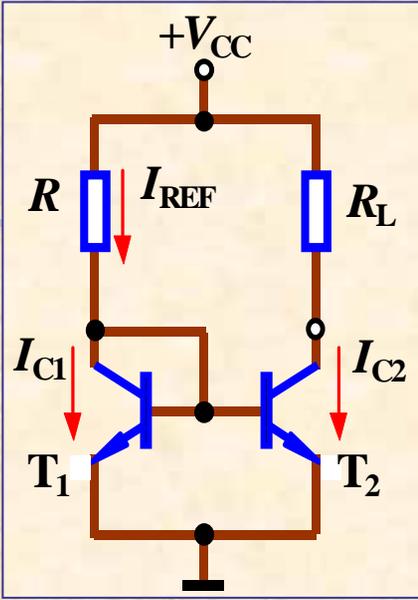
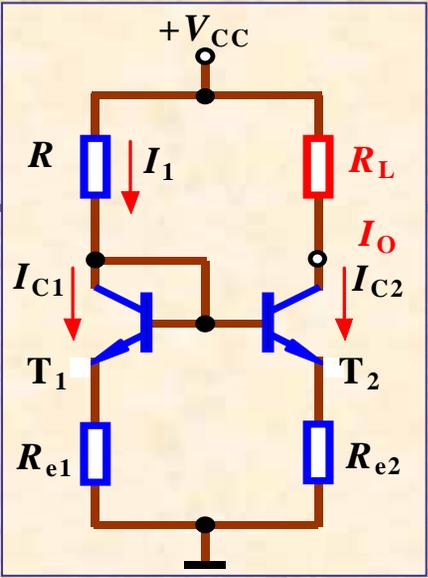
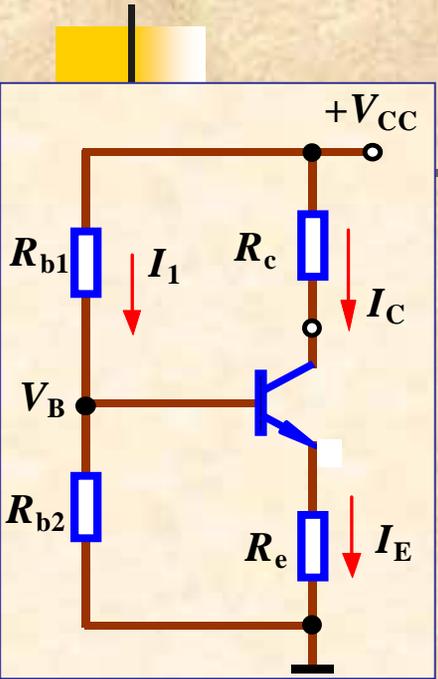


图 6.1.4 多路电流源

$$I_{C1} = I_{REF} \frac{R_e}{R_{e1}} \quad I_{C2} = I_{REF} \frac{R_e}{R_{e2}} \quad I_{C3} = I_{REF} \frac{R_e}{R_{e3}}$$

小结 —— 电流源结构的变化

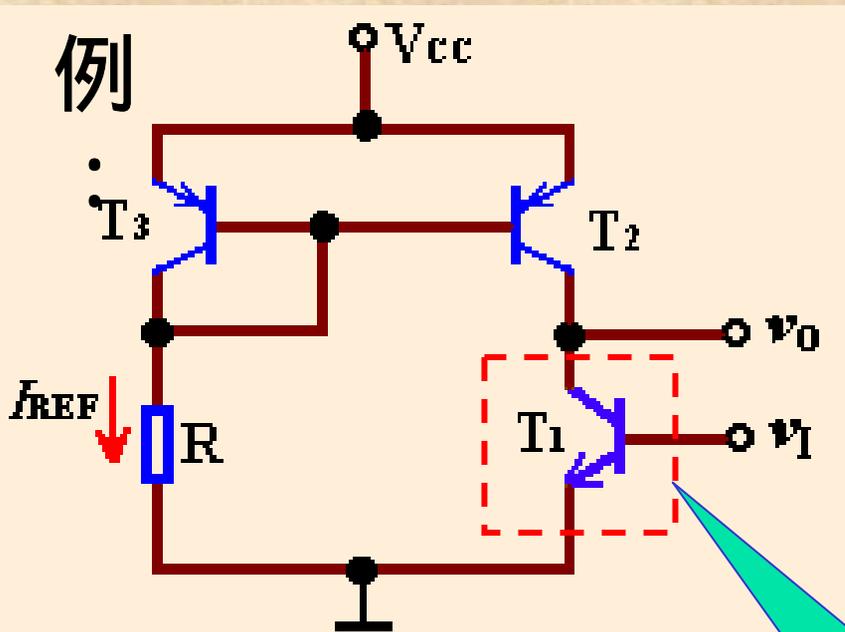


6.1 集成电路运算放大器中的电流源

7. 电流源用作有源负载

电流源的作用：

- (1) 用于提供静态电流并能**稳定静态工作点**，这对直接耦合放大器是十分重要的。
- (2) 用作**有源负载**，可获得增益高的特性。



共射电路的电压增益为：

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{\beta(r_{ce1} // R_c // R_L)}{r_{be}}$$

电流源作有源负载后

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{\beta(r_{ce1} // r_{ce2} // R_L)}{r_{be}}$$

比用电阻 R_c 作负载时提高了

图 6.1.5 电流源用作有源负载

共射放大

例 放大电路如图所示。各三极管都有 $\beta = 49$, $V_{BE} = 0.7V$ 。

∴ (1) 试简要说明各三极管的作用；

(2) 计算电路的电压放大倍数（电容的容抗可忽略不计）。

