

第六章 集成运算放大器内部电路

6.1 电路概述

- (1) 小电阻, 受温度影响大
- (2) 电容限制, pF级
- (3) 电阻很难实现

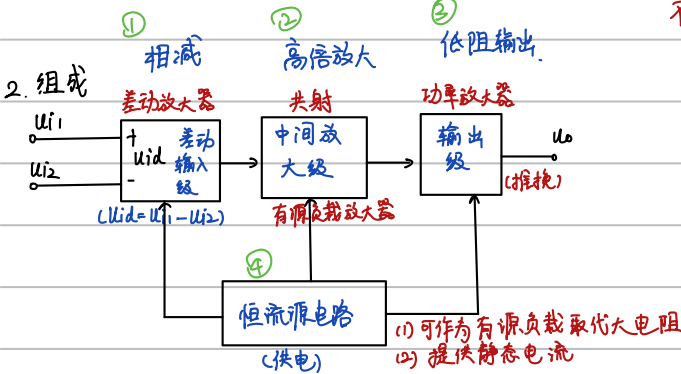
1. 特点

(1) 级间直接耦合
(三极管, 场效应管)

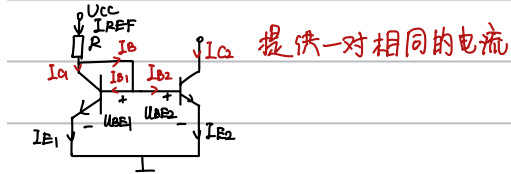
(2) 用有源器件代替无源器件 (R, L, C)

(3) 对称结构抵消干扰

↓ 由半导体构成
① 电阻用电流源替代
② 尽量减小电容——直接耦合
③ 电阻匹配——大量采用对称结构 (成比例, 比例不变)



2. 三极管电流源 (镜像电流源)



$$\therefore U_{BE1} = U_{BE2}$$

$$\therefore I_{E1} = I_{E2} \rightarrow I_{C1} = I_{C2}, I_{B1} = I_{B2}$$

$$I_{C2} = I_{REF} - (I_{B1} + I_{B2}) = I_{REF} - 2I_{B1}$$

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

(实现了对电流的复制)

$$\therefore I_{C2} = \frac{\beta}{\beta+2} I_{REF} = \frac{\beta}{\beta+2} \cdot \frac{U_{CC} - U_{BE(on)}}{R} \approx I_{REF}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_{REF} \frac{1}{1 + \frac{N}{\beta}}$$

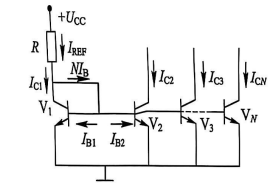


图 6.2.3 多路镜像电流源

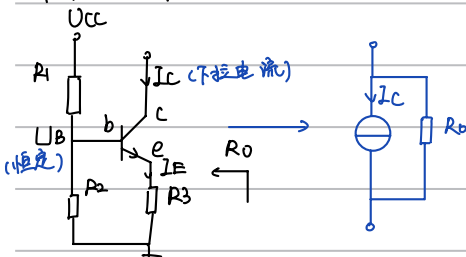
$$I_{C1} = I_{REF} - N I_{B1} = I_{REF} - N \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{N}{\beta}} \quad \text{当 } \beta \text{ 不够大时, } I_{C1} \neq I_{REF}$$

6.2 恒流源电路

6.2.1 三极管电流源

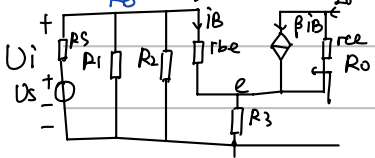
1. 单管电流源



$$U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC}$$

$$U_{EQ} = U_B - U_{BE(on)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC} - U_{BE(on)}$$

$$\therefore I_C \approx I_E = \frac{U_{EQ}}{R_3} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2) R_3} U_{CC} - \frac{U_{BE(on)}}{R_3} \quad \text{恒定}$$



$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} \Big|_{U_i=0} = \frac{(I_0 - \beta I_B) r_{ce} + (I_0 + \beta I_B) R_3}{I_0}$$

$$\beta I_B \cdot R_0' + \beta I_B \cdot r_{be} + (I_0 + \beta I_0) \cdot R_3 = 0$$

$$\text{得 } R_0 = \left(1 + \frac{\beta R_3}{r_{be} + R_0' + R_3} \right) r_{ce} + R_3 \parallel (r_{be} + R_0')$$

$$\approx (1 + \beta) r_{ce}$$

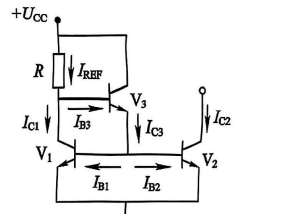


图 6.2.5 射随器隔离的镜像电流源

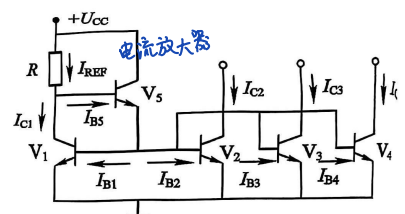


图 6.2.6 改进的多输出镜像电流

$$I_{C1} = I_{REF} - I_{B3} = I_{REF} - \frac{I_{B1} + I_{B2}}{1 + \beta} = I_{REF} - \frac{2I_{B1}}{1 + \beta}$$

$$= I_{REF} - \frac{2I_{C1}}{\beta(1 + \beta)}$$

$$\therefore I_{C1} = \frac{\beta(1 + \beta) + 2}{\beta(1 + \beta)} I_{REF}$$

$$I_{C1} = \frac{U_{CC} - 2U_{BE(on)}}{R}$$

3. 比例电流源

比例电流源是在镜像电流源的基础上，在 V_1 和 V_2 的发射极分别引入电阻 R_{E1} 、 R_{E2} 构成的，如图 6.2.7 所示。由图可知

$$U_{BE1} + I_{E1}R_{E1} = U_{BE2} + I_{E2}R_{E2} \quad (6.2.11)$$

由于晶体管的 $I_E (\approx I_C)$ 与发射结电压 U_{BE} 成指数关系， V_1 、 V_2 管的电流虽然不等，但 U_{BE} 却差很小（如 U_{BE} 增加 60 mV， I_C 就增大 10 倍），故可以认为 V_1 、 V_2 管的发射结电压 U_{BE} 近似相等，即 $U_{BE1} \approx U_{BE2}$ 。由此可见，

$$I_{E1}R_{E1} \approx I_{E2}R_{E2} \quad (6.2.12)$$

当 $\beta \gg 2$ 时，忽略两管的基极电流，可得

$$I_{C2} \approx I_{E2} \approx \frac{R_{E1}}{R_{E2}} I_{C1} \approx \frac{R_{E1}}{R_{E2}} I_{REF} \quad (6.2.13)$$

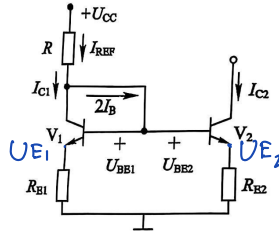


图 6.2.7 比例电流源

$$\begin{aligned} U_{E1} &\approx U_{E2} \\ \therefore \frac{I_{C1}}{I_{C2}} &\approx \frac{U_{E1}}{U_{E2}} = \frac{R_{E1}}{R_{E2}} \end{aligned}$$

5. 负反馈电流源

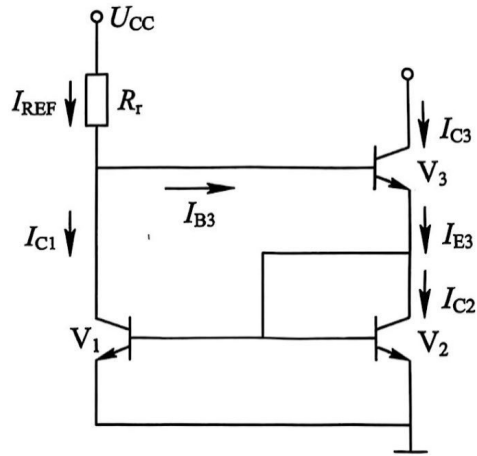


图 6.2.9 威尔逊电流源

$$① I_{C3} \uparrow, I_{E3} \uparrow, I_{B3} \uparrow$$

$$② I_{E3} \approx I_{C2} \uparrow$$

$$③ I_{C1} = I_{C2} \uparrow$$

$$④ I_{B3} = I_{REF} - I_{C2} \quad \downarrow$$

$$⑤ I_{C3} = \beta I_{B3} \downarrow$$

$$I_{REF} = \frac{U_{CC} - 2U_{BE(ON)}}{R}$$

推导 I_{C3}

$$I_{REF} = I_{C1} + I_{B3} = I_{C1} + \frac{I_{C3}}{\beta} = I_{C2} + \frac{I_{C3}}{\beta}$$

$$I_{C3} = \frac{\beta}{1+\beta} I_{E3}$$

$$I_{E3} = I_{C2} + \frac{I_{C1}}{\beta} + \frac{I_{C2}}{\beta} = I_{C2} + \frac{2I_{C2}}{\beta}$$

$$\therefore I_{C3} = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot \frac{\beta+2}{\beta} I_{C2} = \frac{\beta+2}{\beta+1} I_{C2}$$

$$\therefore I_{REF} = \frac{\beta+1}{\beta+2} I_{C3} + \frac{I_{C3}}{\beta} = \frac{\beta^2+2\beta+2}{\beta^2+2\beta} I_{C3}$$

$$\therefore I_{C3} = \frac{\beta^2+2\beta}{\beta^2+2\beta+2} I_{REF} \approx I_{REF}$$

4. 微电流源 (避免使用大阻值电阻) 减小 U

为了进一步减小功耗，在集成电路中常常需要微安级的电流，采用镜像电流源或比例电流源时，需要的基准电阻 R 往往达到兆欧级，这在集成电路中很难实现。另外，当 U_{CC} 变化时，输出电流 I_{C2} 几乎按 U_{CC} 同样的规律波动，因此，以上两种电流源不适用于直流电源在大范围内变化的集成运放。微电流源可以克服这些缺点。微电流源是在镜像电流源的基础上，将比例电流源电路中的 R_{E1} 短路，并相应增大 R_{E2} ，从而得到更小电流的电流源，称为微电流源，如图 6.2.8 所示。显然，当 $\beta \gg 1$ 时， V_2 管集电极电流：

$$U_{BE1} - U_{BE2} = I_{E2}R_{E2} \approx I_{C2}R_{E2} \quad (6.2.15)$$

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_{E2}} \approx 0 \quad (6.2.16)$$

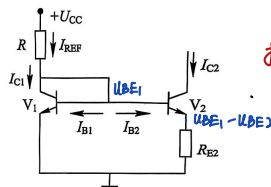


图 6.2.8 微电流源

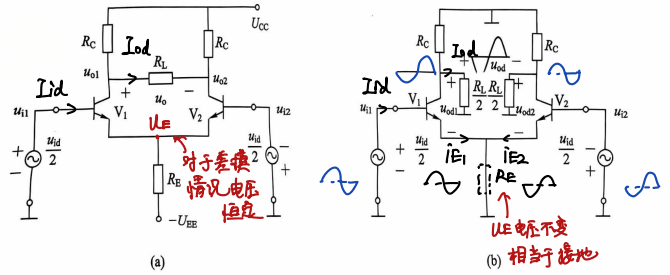
小电压：来自 ΔU_{BE}

$$I_{C2} \approx \frac{U_T}{R_{E2}} \cdot \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \leftarrow \text{允许 } I_{C2} \ll I_{C1}$$

6.3 差分放大器

6.3.1 特点

- (1) 结构对称
- (2) 差动放大
- (3) 共模负反馈
- (4) 克服了零点温漂



① $I_E = I_{E1} + I_{E2} = 0 \therefore R_E$ 两端电势差为 0

相当于 E 点接地

② R_L 两端所加电压大小相等, 方向相反. 相当于 $\frac{R_L}{2}$ 接地

* A_{ud} (差模放大倍数) = $\frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1} - U_{od2}}{U_{id}} = \frac{2U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{U_{od1}}{U_{id1}}$
 双端输出时 $= -\frac{\beta(R_C // \frac{R_L}{2})}{r_{be}} = -\frac{\beta A_L'}{r_{be}}, A_L' = R_C // \frac{R_L}{2}$

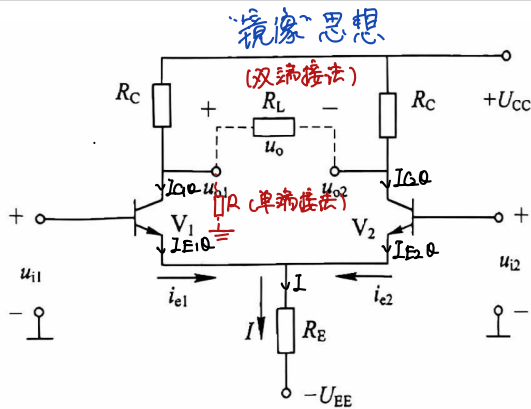
单端输出时 $A_{ud1} = -\frac{1}{2} \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$

* $R_{id} = \frac{U_{id}}{I_{id}} = \frac{2U_{id1}}{I_{id}} = 2r_{be}$

* $R_{od} = \frac{U_{od}}{I_{od}} = \frac{2U_{od1}}{I_{od}} = 2R_C$ (双端)

$R_{od1} = \frac{U_{od1}}{I_{id}} = R_C$ (单端)

6.3.2 长尾式差分放大器



1. 直流工作状态分析

① $I_{CQ} = I_{CQ}, I_{EQ} = I_{EQ} = I_{EQ}$

$\therefore I = I_{EQ} + I_{EQ} = 2I_{EQ} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{R_E}$

$\therefore I_{EQ} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{2R_E} \approx I_{CQ} = I_{CQ} = I_{CQ}$

② $U_{CEQ} = U_{CC} - U_{EQ} = U_{CC} - I_{CQ} \cdot R_C + U_{BEQ}$

③ $U_{O1} = U_{O2} = U_{CC} - I_{CQ} \cdot R_C$

2. 交流指标分析

(1) 差模

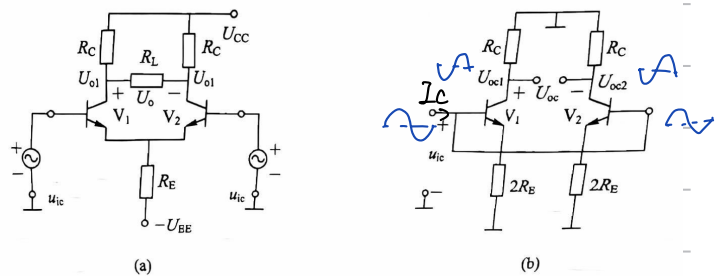
定义: 若输入信号 $U_{i1} = U_{id1}, U_{i2} = U_{id2}$, 且 $U_{id1} = -U_{id2}$

则 U_{id1}, U_{id2} 称为一对差模信号 (大小相等, 符号相反)

$U_{id} = U_{i1} - U_{i2} = 2U_{id1}$

(2) 共模

定义: 输入信号 $U_{i1} = U_{i2} = U_{ic}$ (大小、方向均相同)



① $U_{E1Q} = U_{E2Q} = 2I_{EQ} \cdot R_E = 2R_E \cdot I_{EQ}$

$\therefore U_{OC1} = U_{OC2} \therefore R_L$ 上无电流 $\therefore$ 相当于 R_L 无作用

② * $A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = \frac{U_{oc1} - U_{oc2}}{U_{ic}} = 0$ (双端) 理想情况下

$A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + 2R_E(1 + \beta)} = A_{uc2}$ (单端)
 $\approx -\frac{R_C // R_L}{2R_E}$ (与 β 无关)

$$R_{ic} = \frac{U_{ic}}{I_{ic}} = \frac{U_{ic}}{2I_{i1}} = \frac{1}{2} [r_{be} + (1+\beta) \cdot 2R_E]$$

$$R_{oc} = 2R_C \text{ (双端)}$$

$$R_{oc1} = R_{oc2} = R_C \text{ (单端)}$$

(3) 共模抑制比

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ 理想情况为 } \infty \text{ (双端)}$$

$$K_{CMR(\text{单端})} = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| \approx \frac{\beta \cdot R_L' \cdot R_E}{R_C \cdot r_{be}} \gg 1 \text{ (理想) (单端)}$$

(4) 对任意信号的放大特性

$$U_{i1} = \frac{U_{i1} + U_{i2}}{2} + \frac{U_{i1} - U_{i2}}{2}$$

$$U_{i2} = \frac{U_{i1} + U_{i2}}{2} - \frac{U_{i1} - U_{i2}}{2}$$

共模 差模

$$U_i = U_{i1} - U_{i2} = (U_{id1} - U_{id2}) + \underbrace{(U_{ic1} - U_{ic2})}_{\text{抑制}}$$

$$U_o = A_{uc} \cdot U_{ic} + A_{ud} \cdot U_{id} \approx A_{ud} \cdot U_{id} \text{ (双端)}$$

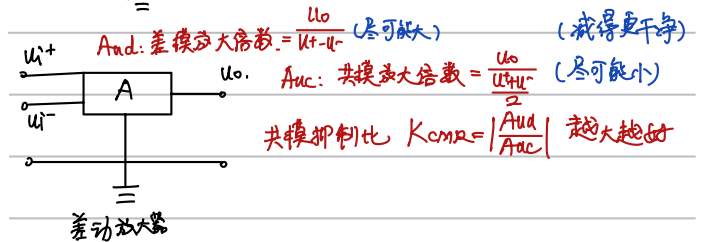
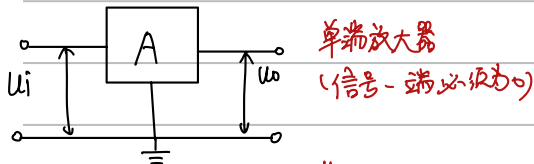
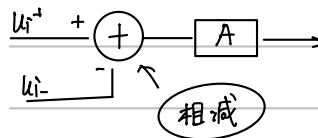
$$U_{o1} = \frac{1}{2} A_{ud} \cdot U_{id} + A_{uc1} \cdot U_{ic} \text{ (单端)}$$

$$\text{要求 } A_{ud} \gg A_{uc1} = -\frac{R_C}{2R_E} \text{ (} \Rightarrow R_E \text{ 越大越好)}$$

$R_{E1}, I_{EQ1}, I_{CQ1}, I_{CQ2}$, 静态工作点变化

解决: 使用恒流源, 电流恒定且电阻很大

作用: 出现在运放第一级, 只实现相减



$$A_{ud}: \text{差模放大倍数} = \frac{U_o}{U_i+ - U_i-} \text{ (尽可能大)} \text{ (减得更干净)}$$

$$A_{uc}: \text{共模放大倍数} = \frac{U_o}{\frac{U_i+ + U_i-}{2}} \text{ (尽可能小)}$$

$$\text{共模抑制比 } K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ 越大越好}$$