



模拟电路基础（下）

集成电路与运算放大器



➤ 教学要求

- 1 了解集成电路的基本概念、组成与加工工艺
- 2 掌握差分放大电路的电路结构、工作原理与参数计算
- 3 了解镜像电流源的电路结构与工作原理
- 4 掌握功率放大器的电路结构与参数计算
- 5 掌握集成运放的基本用法

➤ 教学重点

- 1 差分放大电路的工作原理与参数计算
- 2 各类镜像电流源参数计算
- 3 甲乙类互补功放电路参数计算
- 4 集成运放的基本用法

第5章 集成电路与运算放大器

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 教学难点

- 1 差分放大电路分析设计与参数计算
- 2 功率放大器分析与参数计算

➤ 教学学时

- 1 理论学时8学时

5.1 集成电路与运算放大器基础

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 集成电路基础

集成电路：将整个电路的各个元件做在同一个半导体基片上。

集成电路的优点：性能好、可靠性高、体积小、耗电少、成本低等。

集成电路的分类：

1、小规模集成电路（0~100个元件）

中规模集成电路（100~1000个元件）

大规模集成电路（1000个元件以上）

超大规模集成电路（十万个元件以上）

2、模拟集成电路

数字集成电路

3、集成运算放大器

集成功放

模拟乘法器

模拟锁相环

集成比较器

5.1 集成电路与运算放大器基础

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 集成电路基础



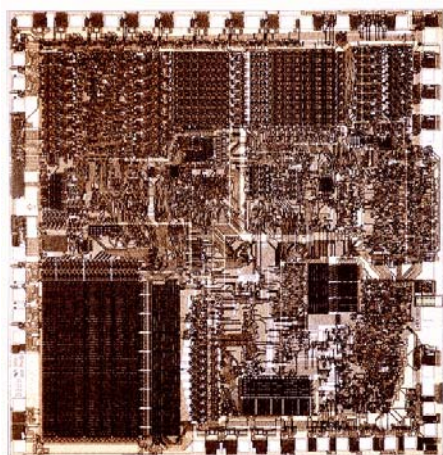
5.1 集成电路与运算放大器基础

6

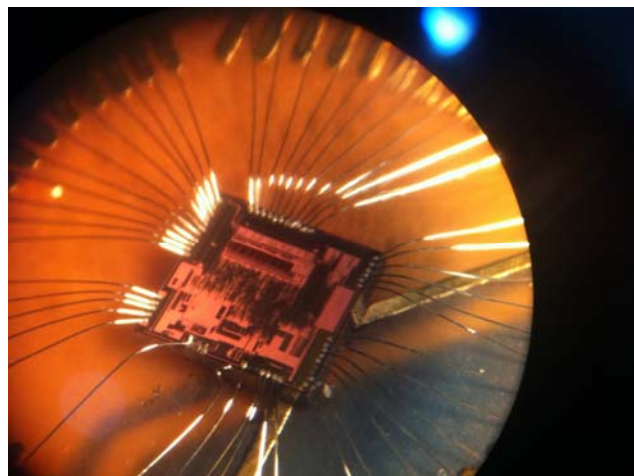


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 集成电路基础



Intel处理器版图



显微镜下的集成电路的晶圆图绑定过程

5.1 集成电路与运算放大器基础

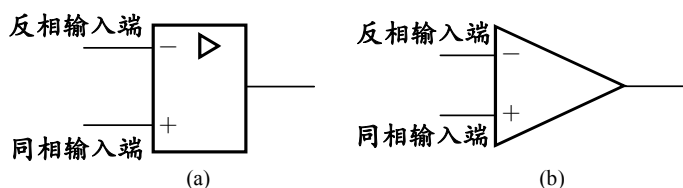
7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 集成运算放大器

集成运算放大器(Integrated Operational Amplifier) 简称**集成运放**，是20世纪60年代发展起来的一种新型器件，是由多级直接耦合放大电路组成的高增益模拟集成电路。



运算放大器的代表符号

(a) 国家标准规定的符号 (b) 国内外常用符号



扁平式 (SOP)



单列直插式 (SIP)



双列直插式 (DIP)



SOT23-5

5.1 集成电路与运算放大器基础

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

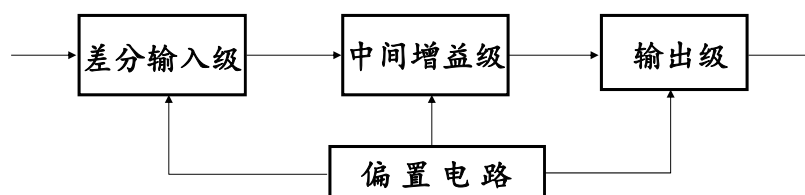
➤ 集成运算放大器

输入级：输入电阻大、噪声低、零漂小；

中间级：提供电压增益，可由一级或多级放大电路组成；

输出级：低输出电阻，一般由电压跟随器或互补电压跟随器组成；

偏置电路：为各级提供合适的偏置电流。



集成运放的组成框图

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

1. 差模信号和共模信号的概念

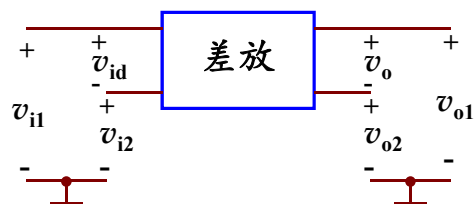
$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad \text{差模信号}$$

$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) \quad \text{共模信号}$$

$$\begin{aligned} v_o &= v_{o1} - v_{o2} = v'_o + v''_o \\ &= A_{vd}v_{id} + A_{vc}v_{ic} \end{aligned}$$

其中 v'_o —— 差模信号产生的输出

v''_o —— 共模信号产生的输出



差分放大电路输入输出示意图

$$A_{vd} = \frac{v'_o}{v_{id}} \quad \text{差模增益} \quad A_{vc} = \frac{v''_o}{v_{ic}} \quad \text{共模增益}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad \text{共模抑制比}$$

反映抑制零漂能力的指标

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

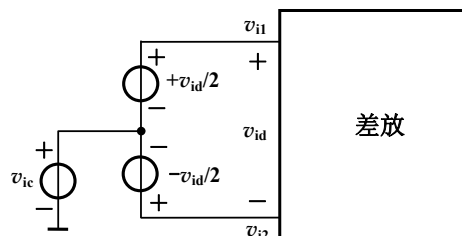
➤ 差分放大器的工作原理

1. 差模信号和共模信号的概念

$$\text{根据 } v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2})$$

$$\text{有 } v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$$

$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$



两输入端中的共模信号大小相等，相位相同；差模信号大小相等，相位相反。

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

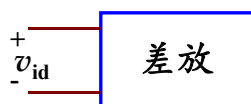
11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

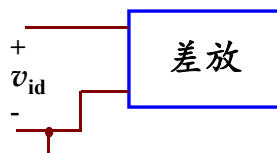
➤ 差分放大器的工作原理

1. 差模信号和共模信号的概念

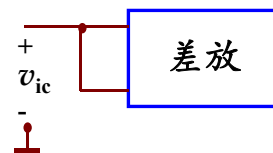


(a)

差模等效输入方式



(b)



共模等效输入方式

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

12



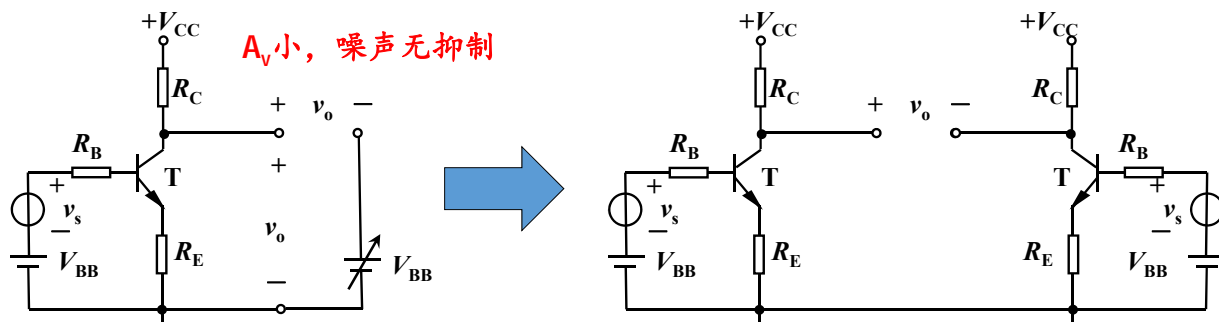
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理

设计一个电路，可以抑制零点漂移与混入的噪声信号。

思路：零点漂移其实是Q点漂移，稳定Q点；设计随Q点与噪声漂移的电压源



5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

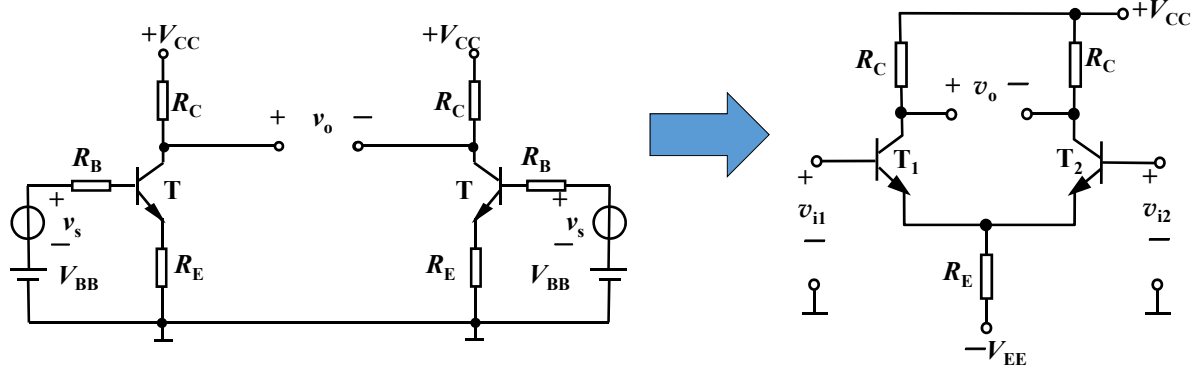
13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理



思考：1、输入信号 v_{i1} 和 v_{i2} 相比原来有何变化？2、 R_E 的改动有什么好处？

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

14



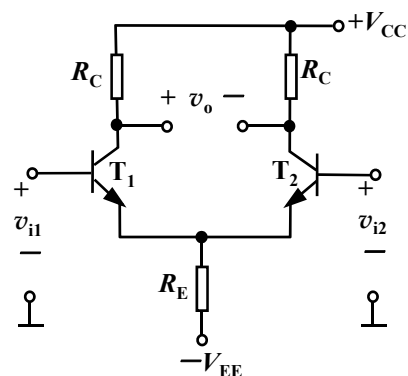
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理

基本的差动式放大电路：

- 由两个特性完全相同的晶体管 T_1 、 T_2 组成对称电路
- 其余元件的参数也完全对称
- 输出为两管的集电极电位之差
- 采用正负双电源，负电源保证三极管发射结的正向导通，使三极管能够正常放大
- 电阻 R_E 具有负反馈的作用，能够稳定Q点，具有减小每一边电路的零点漂移的作用。



典型的BJT差分放大电路

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

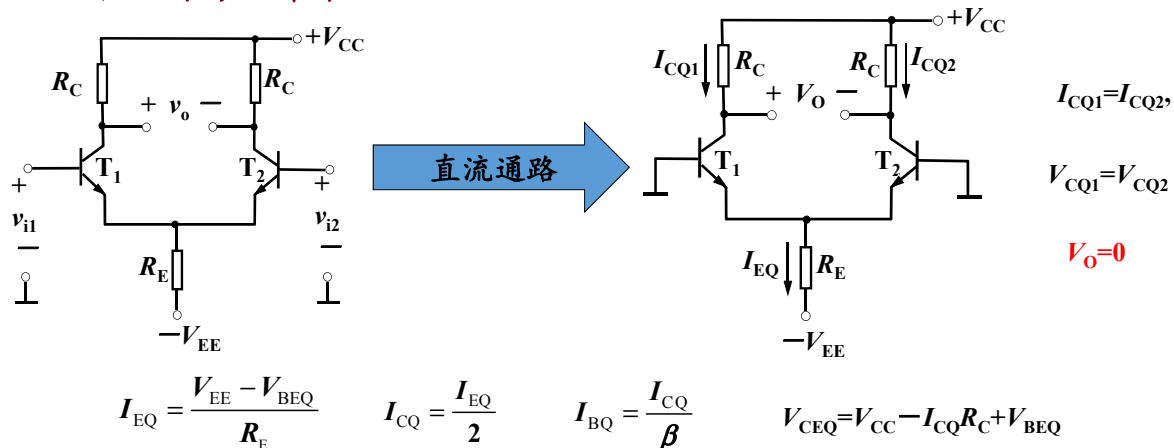
15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理



5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

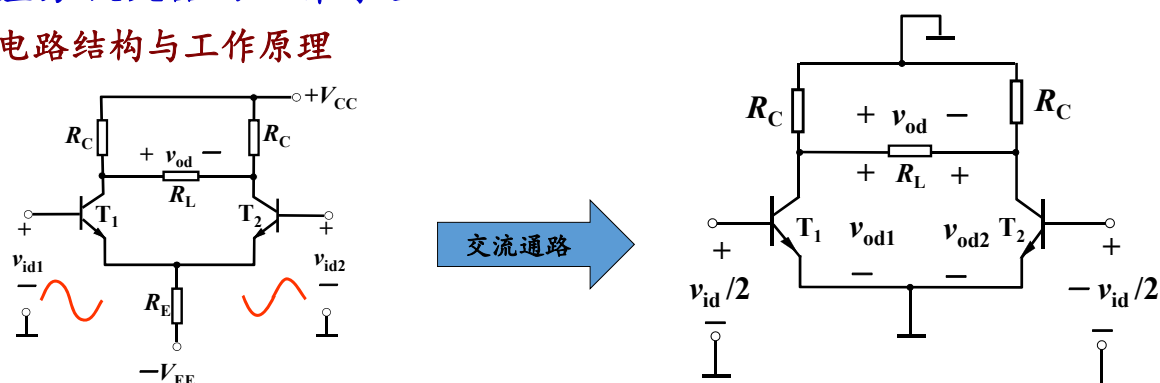
16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理



差模输入时: $v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$, $v_{id1} = \frac{v_{id}}{2}$, $v_{id2} = -\frac{v_{id}}{2}$

$i_{C1} = I_{CQ} + i_c$, $i_{C2} = I_{CQ} - i_c$, $i_E = i_{C1} + i_{C2} = 2I_{CQ} \approx I_{EQ}$. 交流电流不经过 R_E , 无压差, 故交流接地。

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

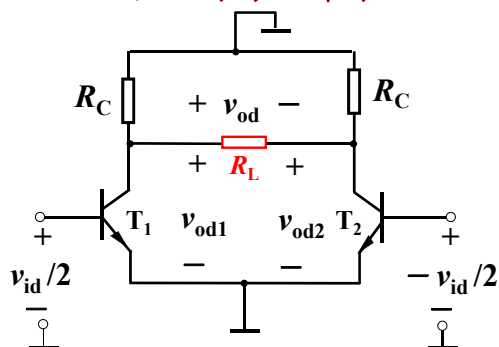
17



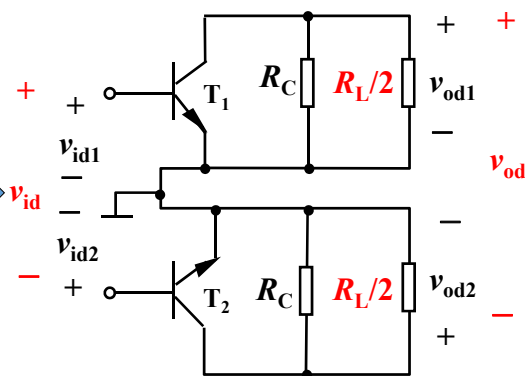
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理



R_L 等效



根据对称性, R_L 的可等效拆分为两个相等的电阻, 中间为参考地。

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理

$$A_{vd1} = \frac{v_{od1}}{v_{id}} = \frac{v_{od1}}{2v_{id1}} = \frac{1}{2} A_{v1} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$A_{vd2} = \frac{v_{od2}}{v_{id}} = \frac{v_{od2}}{-2v_{id2}} = -\frac{1}{2} A_{v2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

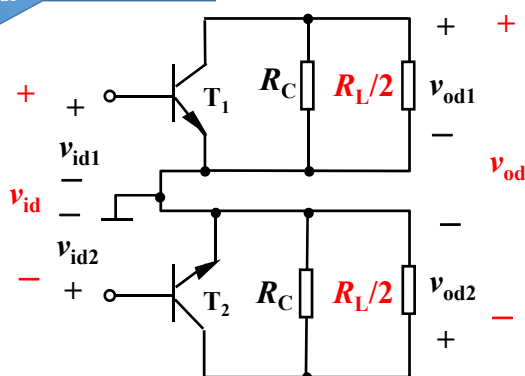
$$A_{vd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{v_{od1} - v_{od2}}{v_{id}} = A_{vd1} - A_{vd2} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R_{id} = 2r_{be}$$

$$R_{od} \approx 2R_C$$

输入差模信号时电压增益与共射放大电路一致。

也可按照 v_{od1} 和 v_{id} 以及 v_{id1} 的关系推导



5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理

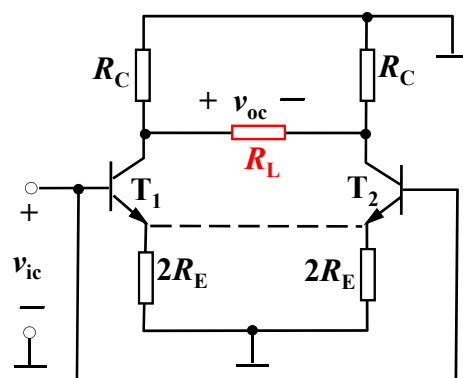
共模信号条件下与直流通路类似，根据电路对称性

$$A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = 0$$

为了维持e极电压不变，等效为 $2R_E$ 到两管

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

$$R_{oc} \approx 2R_C$$



5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理

差分放大电路的主要参数总结

$$\text{共模增益 } A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = 0 \quad \text{差模增益 } A_{vd} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$\text{差模输入输出电阻 } R_{id} = 2r_{be} \quad R_{od} \approx 2R_C$$

$$\text{共模输入输出电阻 } R_{ic} = \frac{1}{2} [r_{be} + (1 + \beta)2R_E] \quad R_{oc} \approx 2R_C$$

$$\text{共模抑制比 } K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = \infty \quad \text{两个二极管换取的性能提升}$$

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

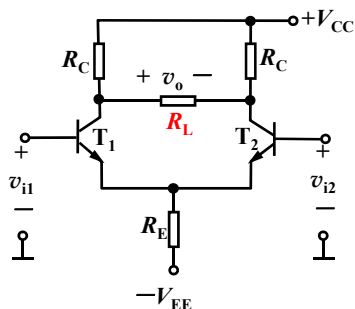
21



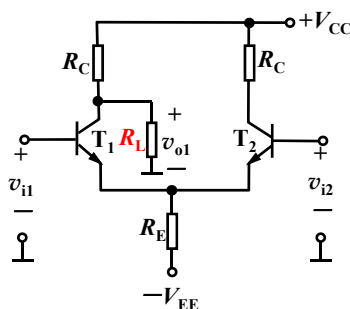
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理



双入双出



双入单出

差模性能:

$$A_{vd} = \frac{1}{2} \cdot \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$$

$$R_{od} \approx R_C$$

增益为什么不同?

共模性能:

$$A_{vc} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)2R_E}$$

$$R_{oc} \approx R_C$$

如何改进?

共模抑制比:

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \approx \frac{(1 + \beta)R_E}{r_{be}}$$

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

2. 电路结构与工作原理

单入等效为双入的模式:

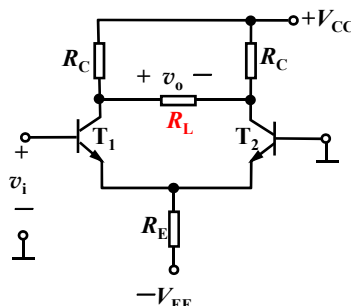
$$v_i = \frac{v_i}{2} + \frac{v_i}{2} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$$

$$0 = \frac{v_i}{2} - \frac{v_i}{2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

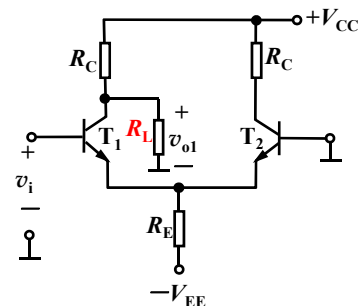
$$v_o = A_{VD}v_{id} + A_{VC}v_{ic} = A_{VD}v_i + A_{VC}\frac{v_i}{2}$$

$$\text{双出: } v_o = A_{VD}v_{id} + A_{VC}v_{ic} = A_{VD}v_i$$

单出: 按公式推导



单入双出



单入单出

5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 差分放大器的工作原理

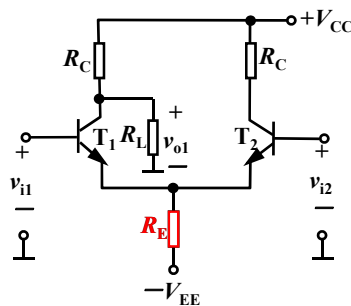
3. 差分放大器的改进

共模抑制比: $K_{\text{CMR}} = \left| \frac{A_{\text{vd}}}{A_{\text{vc}}} \right| \approx \frac{(1+\beta)R_{\text{E}}}{r_{\text{be}}}$

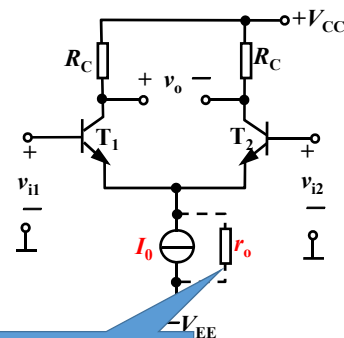
单纯的增大 R_{E} 是否可行?

$$R_{\text{E}} \uparrow \begin{cases} K_{\text{CMR}} \uparrow \\ I_{\text{EQ}} \downarrow \rightarrow I_{\text{CQ}} \downarrow \rightarrow r_{\text{be}} \uparrow \rightarrow K_{\text{CMR}} \downarrow \end{cases}$$

同时，静态工作点太低。



单端输出



交流阻抗无穷大