



# 模拟电路基础（下）

## 集成电路与运算放大器

### 5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）



#### ➤ 差分放大器的工作原理

$T_1$ 和 $T_2$ 参数对称,电路参数为 $V_{CC}=V_{EE}=24V$ ,恒流电流源为 $I_{EE}=2mA$ ,  $\beta=100$ ,  $V_{BE}=0.7V$ ,  $R_B=1k\Omega$ ,  $R_C=10k\Omega$ ,  $R_L=10k\Omega$ 。

(1)试估算Q点; (2)试计算在差模输入信号下的输入电阻、输出电阻和差模电压放大倍数;(3)试求输入电压在-10mV时输出电压的值。

#### (1)Q点计算

$$I_{E1}=I_{E2}=I_E=\frac{I_{EE}}{2}=1mA$$

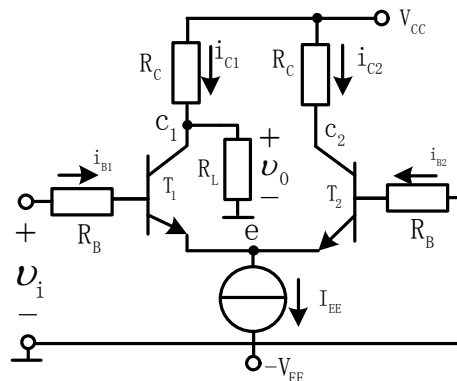
$$I_{B1}=I_{B2}=\frac{I_E}{1+\beta}\approx 0.01mA$$

$$V_E=0-I_{B1}R_B-V_{BE}\approx -0.7V$$

$$I_{C1}+\frac{V_{C1}}{R_L}=\frac{V_{CC}-V_{C1}}{R_C}$$

$$V_{C1}=7V$$

$$V_{CE1}=V_{C1}-V_E=7.7V$$



## 5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

3



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 差分放大器的工作原理

$T_1$ 和 $T_2$ 参数对称,电路参数为 $V_{CC}=V_{EE}=24V$ ,恒流电流源为 $I_{EE}=2mA$ ,  $\beta=100$ ,  $V_{BE}=0.7V$ ,  $R_B=1k\Omega$ ,  $R_C=10k\Omega$ ,  $R_L=10k\Omega$ 。

(1)试估算Q点; (2)试计算在差模输入信号下的输入电阻、输出电阻和差模电压放大倍数;(3)试求输入电压在 $-10mV$ 时输出电压的值。

### (2)参数计算

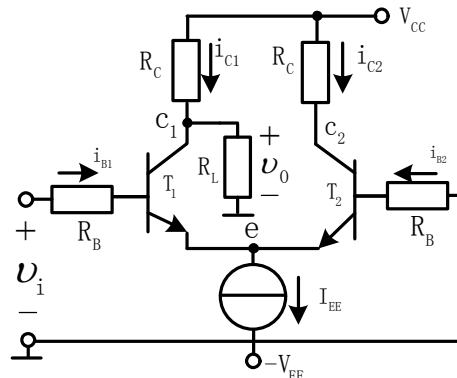
$$r_{be}=r_{bb'}+r_{b'e}=200+(1+\beta) V_T / I_E \approx 2.8k\Omega$$

$$R_i=2(r_{be}+R_B)=7.6k\Omega \quad R_o=R_C=10k\Omega$$

$$A_{VD}=-\frac{1}{2} \frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{r_{be}+R_B} \approx -65.8$$

单出共模增益=0

(3)输出电压  $v_o = A_{VD} v_{id} = 0.658V$



## 5.2 集成运放的输入级（差分放大电路）

4



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 差分放大器的工作原理

### 4.差分放大器的传输特性

$$i_{C1} = I_S e^{\frac{v_{BE1}}{V_T}}$$

$$i_{C2} = I_S e^{\frac{v_{BE2}}{V_T}}$$

$$I_{EE} \approx i_{C1} + i_{C2} = i_{C1} (1 + e^{\frac{v_{BE2} - v_{BE1}}{V_T}})$$

$$i_{C1} = \frac{1}{2} I_{EE} + \frac{1}{2} I_{EE} \text{th}(\frac{v_{id}}{2V_T})$$

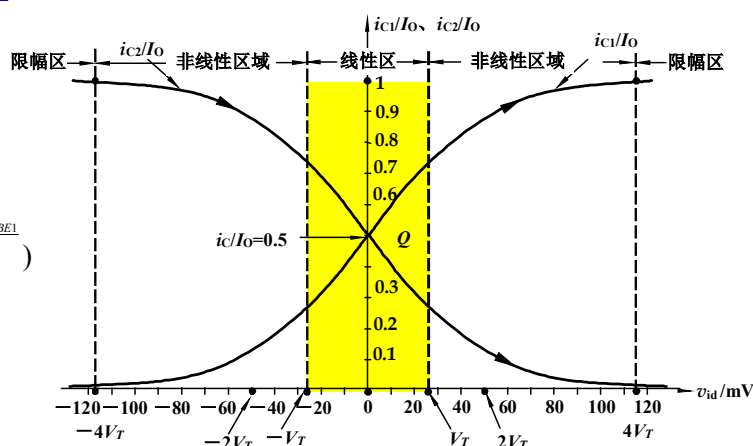
$$i_{C2} = \frac{1}{2} I_{EE} - \frac{1}{2} I_{EE} \text{th}(\frac{v_{id}}{2V_T})$$

$$i_{C1} - i_{C2} = I_{EE} \text{th}(\frac{v_{id}}{2V_T})$$

双曲正切函数

$$\text{th}(x) = [e^x - e^{-x}] / [e^x + e^{-x}]$$

$$\text{th}(x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \dots$$



### 5.3 集成运放的偏置与负载

5

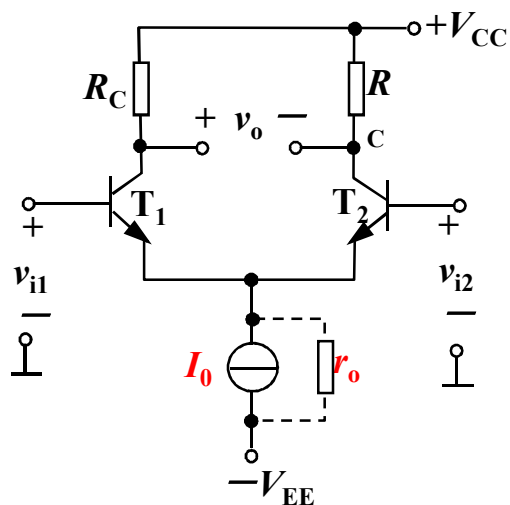


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 镜像电流源

电流源为放大电路提供合理的静态工作点

如何设计？



### 5.3 集成运放的偏置与负载

6



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 镜像电流源

##### 1. 基本镜像电流源

$T_1$ 、 $T_2$ 的参数相同

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R} \approx \frac{V_{CC}}{R} \quad \text{“物”} \quad I_O = I_{C2} = I_{C1} \quad \text{“像”}$$

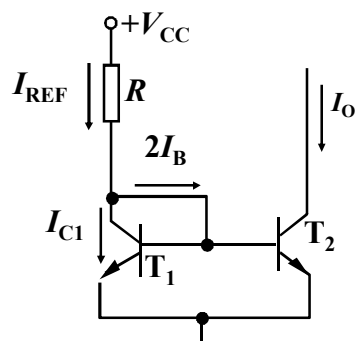
$$I_{REF} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_O + 2I_B$$

$$I_O = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \quad \beta \gg 2 \Rightarrow I_O \approx I_{REF}$$

$$r_O = r_{ce}$$

不是严格的镜像关系

交流等效电阻大



基本镜像电流源

特点：

①  $I_O$  受电源  $V_{CC}$  变化的影响较大；

② 要得到较小的电流，就需要较大的电阻  $R$ ，故此电路适用于工作电流较大的场合（毫安级）；

### 5.3 集成运放的偏置与负载

7



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 镜像电流源

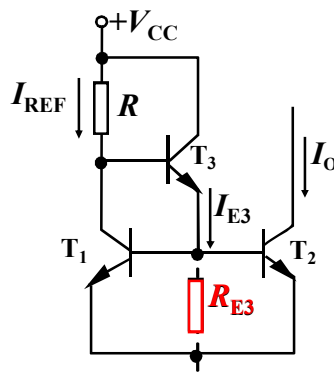
##### 2. 带有缓冲级的镜像电流源

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE(on)}}{R}$$

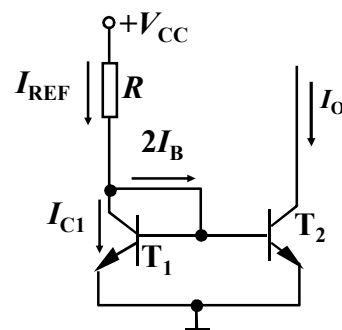
$$I_O = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta(\beta+1)}}$$

$R_{E3}$ 的作用?

适当增大 $I_{E3}$ ，避免电流放大倍数过小



改进型镜像电流源



基本镜像电流源

### 5.3 集成运放的偏置与负载

8



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 镜像电流源

##### 3. 比例电流源

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R + R_1} \quad V_{BE1} + I_{E1}R_1 = V_{BE2} + I_{E2}R_2$$

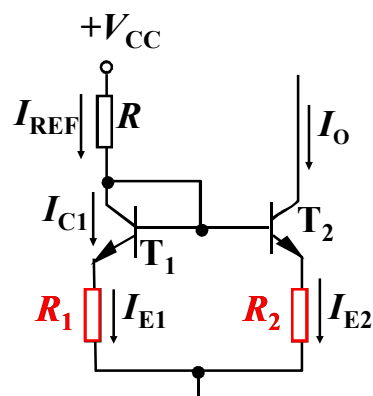
$$V_{BE1} - V_{BE2} = I_{E2}R_2 - I_{E1}R_1 \approx I_O R_2 - I_{C1}R_1$$

$$V_{BE1} - V_{BE2} \approx V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_S} - V_T \ln \frac{I_O}{I_S} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_O}$$

$$I_O = I_{C1} \frac{R_1}{R_2} + \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{I_{C1}}{I_O} \approx I_{C1} \frac{R_1}{R_2} \approx I_{REF} \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_o \approx \left( 1 + \frac{\beta R_2}{R_2 + r_{be2} + R_1 // R} \right) r_{ce2}$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} \approx \frac{R_1}{R_2}$$



比例式电流源

### 5.3 集成运放的偏置与负载

9



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

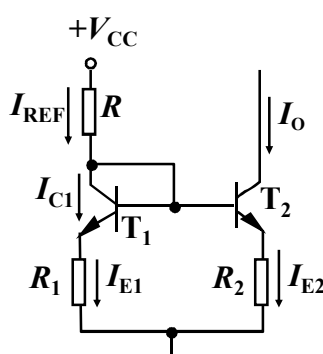
#### ► 镜像电流源

##### 4. 微电流源

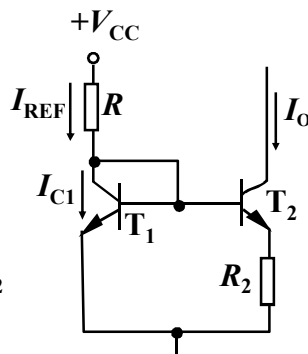
$$I_O = I_{C1} \frac{R_1}{R_2} + \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{I_{C1}}{I_O} \quad R_1 = 0$$

$$I_O = \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{I_{C1}}{I_O} \approx \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{I_{REF}}{I_O}$$

$$I_O \approx \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{V_{CC}}{R I_O}$$



比例式电流源



微电流源

微电流源电路能以千欧数量级的电阻 $R$ 提供微安级的电流 $I_O$ ，且输出电流 $I_O$ 对电源电压变化不敏感，广泛用于集成电路设计中。

### 5.3 集成运放的偏置与负载

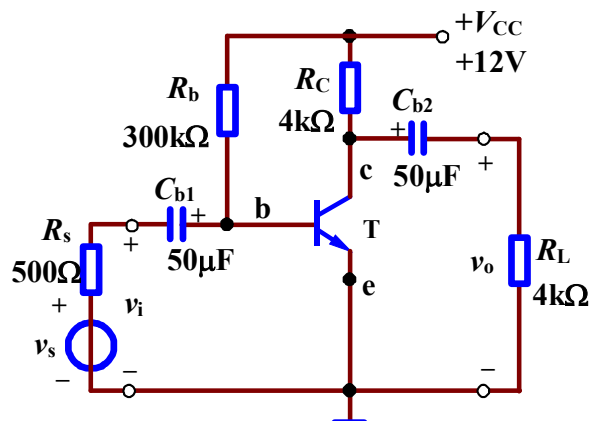
10



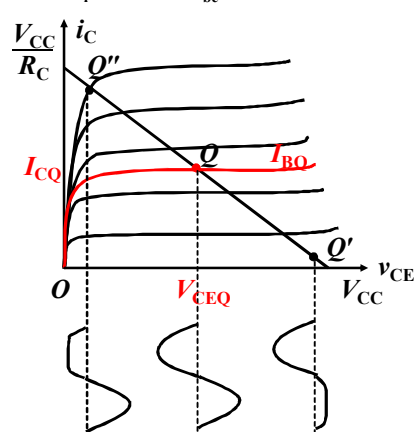
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 镜像电流源

除了设置静态工作点，电流源的其它作用？



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{\beta \cdot (R_C \parallel R_L)}{r_{be}}$$

增大 $R_C$ ?

需求：不影响 $Q$ 点的同时增大 $R_C$

## 5.3 集成运放的偏置与负载

11



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

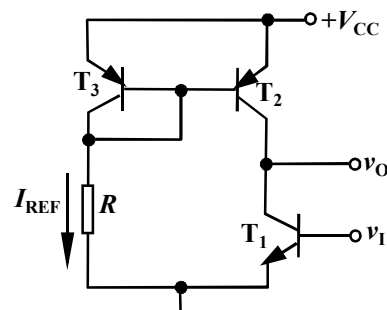
### ► 镜像电流源

#### 5. 电流源应用-有源负载

电流源电路除了作为偏置电路提供静态偏置电流外，还可利用其交流输出电阻大的特点，作有源电阻使用，以提高单级放大电路的增益。 $T_2$ 、 $T_3$  组成的镜像电流源作为  $T_1$  管的集电极有源负载。

$$A_v = -\frac{\beta \cdot (r_{ce} // R_L)}{r_{be}}$$

此外，电流源也可用作发射极有源负载。



电流源电路用作有源负载

## 5.4 集成运放的中间级

12



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ► 中间级概述

运算放大器的中间级放大器：

输入级和输出级之间的电路统称为中间级放大电路

中间级的主要功能：

- ✓ 提供足够大的电压增益；
- ✓ 将输入级的双端输出变为单端输出；
- ✓ 实现电位移动。

## 5.4 集成运放的中间级

13



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ► 双端变单端电路

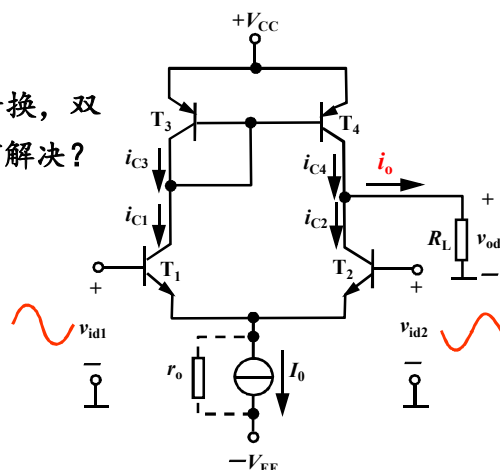
问题：集成运放一般有2个输入、1个输出，需要转换，双入单出的差分放大电路可实现，但增益折半，如何解决？

$$i_{C1} = I_{CQ1} + \Delta i_{C1} = I_{CQ} + \Delta i_C$$

$$i_{C2} = I_{CQ2} + \Delta i_{C2} = I_{CQ} - \Delta i_C$$

$$i_{C3} \approx i_{C1} \quad i_{C4} \approx i_{C3} \approx i_{C1}$$

$$i_o = i_{C4} - i_{C2} = i_{C1} - i_{C2} = 2\Delta i_C$$



有源负载差分放大电路

有源负载差分放大电路在单端输出时具有双端输出的特性。

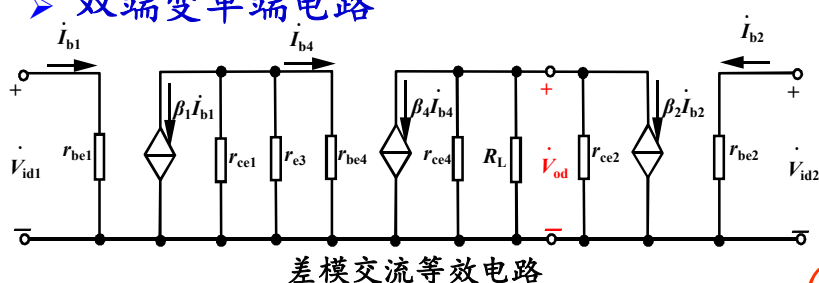
## 5.4 集成运放的中间级

14



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ► 双端变单端电路



差模交流等效电路

$$\dot{V}_{od} = -(\beta_4 \dot{I}_{b4} + \beta_2 \dot{I}_{b2})(r_{ce4} // r_{ce2} // R_L)$$

$$\dot{V}_{id} = 2\dot{V}_{id1} = 2\dot{I}_{b1} r_{be1}$$

$$\beta_2 = \beta_4 = \beta \quad \dot{I}_{b4} = -\dot{I}_{b1} \quad \dot{I}_{b1} = -\dot{I}_{b2}$$

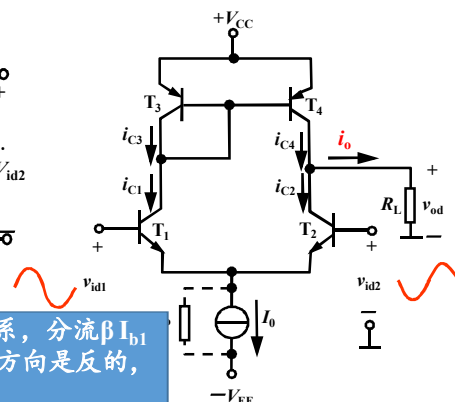
$$R_{id} = r_{be1} + r_{be2} = 2r_{be}$$

$$R_{od} = r_{ce2} // r_{ce4}$$

为什么？ $r_{ce}$ 忽略， $r_e$ 与 $r_{be}$ 有 $\beta$ 倍关系，分流 $\beta I_{b1}$ ， $I_{b4} = -I_{b1}$ ；或 $I_{c3} = I_{c4}$ ， $I_{b1} = I_{b4}$ ，假设方向是反的，所以有负号

$$A_{od} = \frac{\beta(r_{ce4} // r_{ce2} // R_L)}{r_{be1}}$$

有源负载差分放大电路



## 5.4 集成运放的中间级

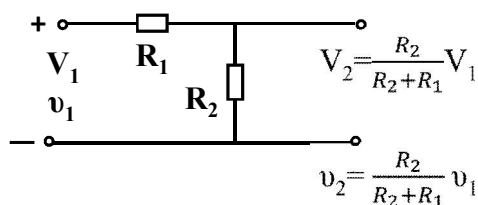
15



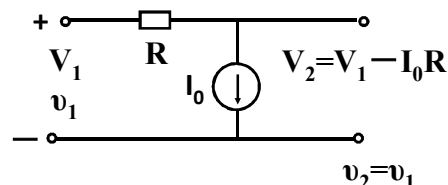
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 电平移动电路

使用电平移动电路的原因：运算放大器极与极之间采用直接耦合，在信号传输的过程中，直流电平被抬高。



直流电平变化的同时，交流信号幅度也受到了影响。



因为恒流源的交流电阻很大  $r \gg R$ ，直流电阻较小，故： $v_2 \approx v_1$ ， $V_2 = V_1 - I_0 R$ 。

还存在什么问题？

输入阻抗分压等……

## 5.4 集成运放的中间级

16

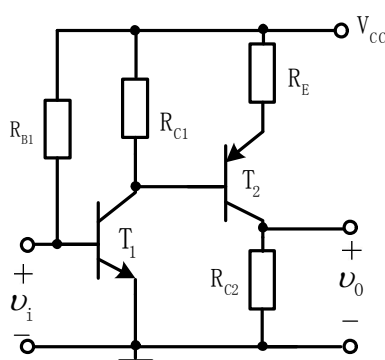


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 电平移动电路

#### (a) 窄带电平移动电路

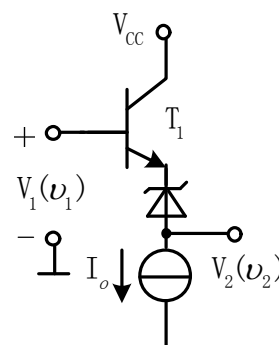
$T_1$ 是NPN管， $T_2$ 是PNP管，该电路既对信号进行放大，又兼起电平移动地作用。



(a)窄带电平移动

#### (b) 宽带电平移动电路

$T_2$ 管称为横向的PNP管，使得电路的带宽较窄。一般采用稳压二极管的电路实现。



(b)宽带电平移动



## 5.5 集成运放的输出级

17

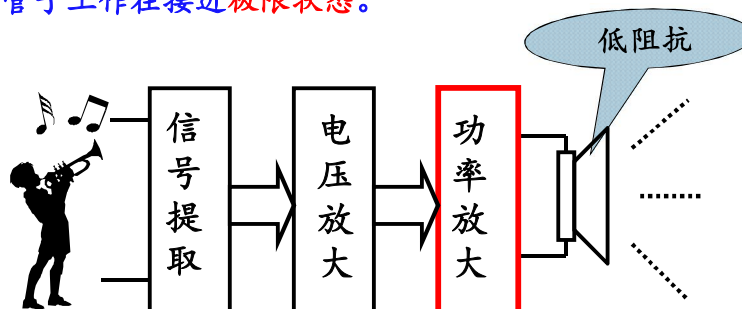


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ► 功率放大器概述

功率放大器的作用：用作放大电路的**输出级**，以驱动执行机构。如使扬声器发声、继电器动作、仪表指针偏转等。

功率放大电路的特点：是一种以**输出较大功率**为目的的放大电路，要求同时输出**较大的电压和电流**。管子工作在**接近极限状态**。



## 5.5 集成运放的输出级

18

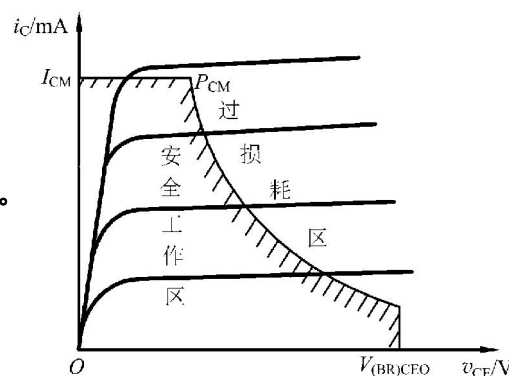


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ► 功率放大器概述

设计功放电路应注意的问题

- (1) 不能超过极限值： $I_{CM}$ 、 $V_{(BR)CEO}$ 、 $P_{CM}$ 。余量1倍！
- (2) 电流、电压信号比较大，减小波形失真。
- (3) 处于大信号工作状态，小信号模型失效，采用图解法。
- (4) 电源提供的能量尽可能转换给负载，减少晶体管及线路上的损失。即**注意提高电路的效率 ( $\eta$ )**。



$$\eta = \frac{P_{o\max}}{P_E} \times 100\%$$

$P_{o\max}$ : 负载上得到的交流信号功率。  
 $P_E$ : 电源提供的直流功率。

## 5.5 集成运放的输出级

19



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

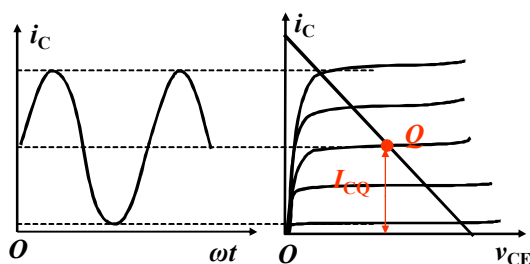
### 功率放大器概述

功放电路的分类

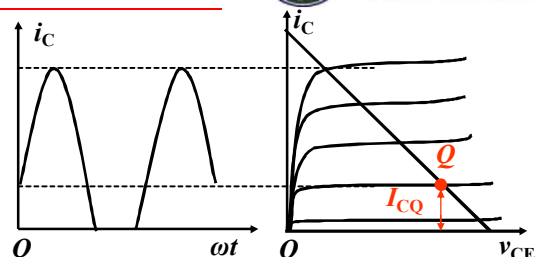
根据正弦信号整个周期内三极管的导通情况划分

甲类：一个周期内均导通 乙类：导通角等于 $180^\circ$

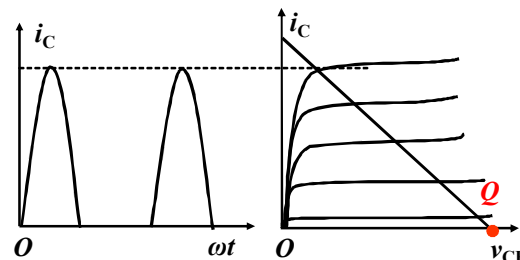
甲乙类：导通角大于 $180^\circ$



甲类 晶体管的导通角 $\theta=360^\circ$



甲乙类 晶体管的导通角  $180^\circ < \theta < 360^\circ$



乙类 晶体管的导通角 $\theta=180^\circ$

## 5.5 集成运放的输出级

20



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### 甲类功率放大器

$$V_{cem(max)} = \frac{1}{2}(V_{CC} - V_{CE(sat)})$$

$$I_{cm(max)} = I_{CQ}$$

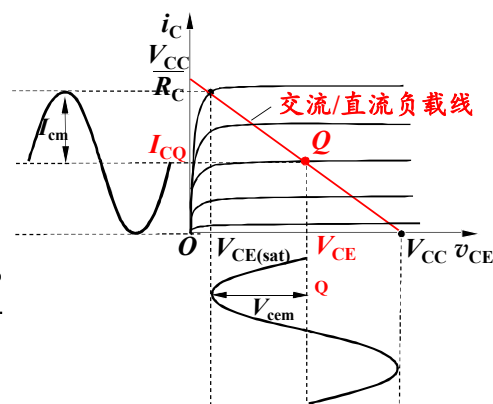
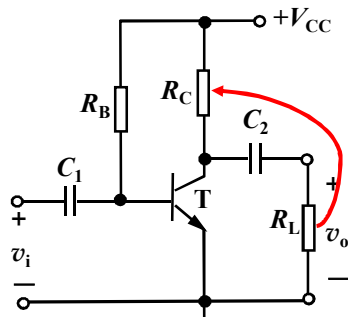
$$P_D = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_C V_{CC} d\omega t = I_{CQ} V_{CC}$$

$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_C v_{CE} d\omega t = I_{CQ} V_{CEQ} - \frac{1}{2} I_{cm} V_{cem}$$

$$P_{om} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_C^2 R_C d\omega t = I_{CQ} V_{CEQ} + \frac{1}{2} I_{cm} V_{cem}$$

只考虑交流输出功率

$$\eta_{max} = \frac{P'_{om}}{P_D} = 25\%$$



图解分析

## 5.5 集成运放的输出级

21



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 甲类功率放大器

如何提高输出功率???

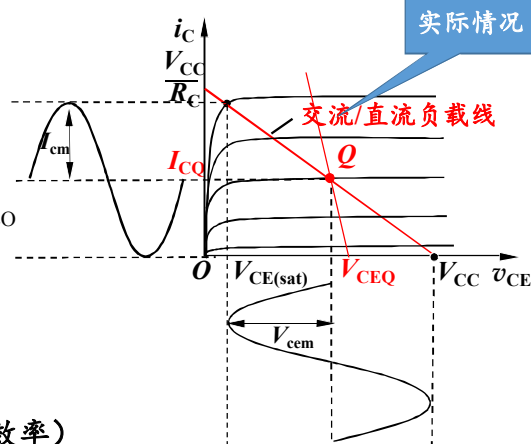
$$\left\{ \begin{array}{l} P_o = V_o I_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} \\ V_{om} \uparrow, I_{om} \uparrow \Rightarrow P_o \uparrow \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_{CM}, P_{CM}, V_{(BR)CEO} \\ \text{安全区域限制} \\ \text{要求最佳负载} \end{array}$$

$$P_o = P_D - P_T$$

电源功率  $P_D$  一定时:  $P_T \downarrow \Rightarrow P_o \uparrow$  (即提高效率)

$Q$  下移  $\rightarrow P_T \downarrow \rightarrow$  效率  $\eta \uparrow \rightarrow$  但非线性失真严重

$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_C v_{CE} d\omega t = I_{CQ} V_{CEQ} - \frac{1}{2} I_{cm} V_{cem}$$



图解分析

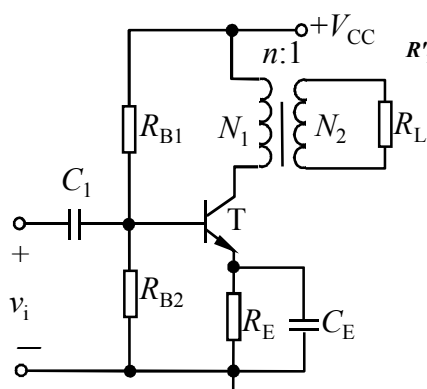
## 5.5 集成运放的输出级

22

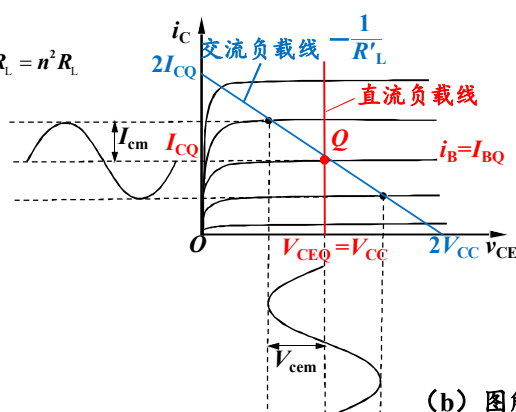


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 甲类功率放大器



(a) 变压器耦合的甲类功率放大电路



(b) 图解分析

$$P_o = \frac{1}{2} V_{cem} I_{cm}$$

$$P_{om} = \frac{1}{2} V_{CC} I_{CQ}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{om}}{P_D} = 50\%$$

实际30%~35%

## 5.5 集成运放的输出级

### 乙类互补对称功放

#### 1. 电路组成与工作原理

问题:

甲类功放效率低

乙类功放静态功耗低, 效率高, 但是存在截止失真。

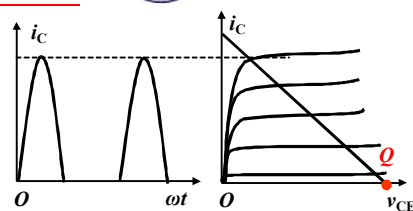
解决:

由一对NPN、PNP特性相同的互补三极管组成, 采用正、负双电源供电。两个三极管在信号正、负半周轮流导通, 使负载得到一个完整的波形。

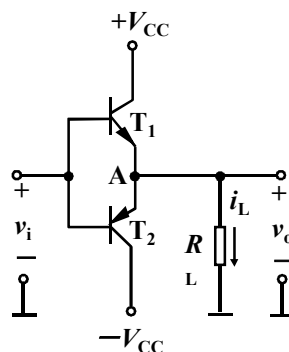
23



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY



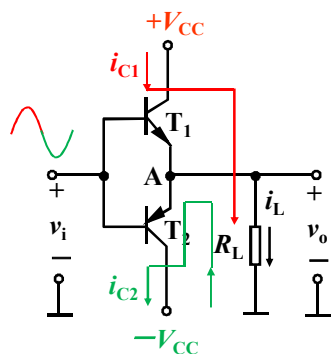
乙类 晶体管的导通角  $\theta=180^\circ$



## 5.5 集成运放的输出级

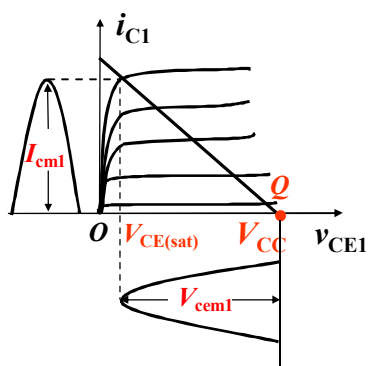
### 乙类互补对称功放

#### 1. 电路组成与工作原理

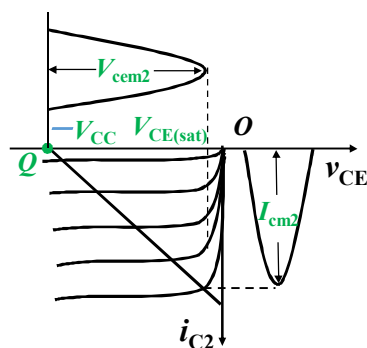


静态:  $I_{CQ1}=I_{CQ2}=0$

$V_{CEQ1}=+V_{CC}$ ,  $V_{CEQ2}=-V_{CC}$



(a)  $v_i > 0$  时  $T_1$  管的工作情况



(b)  $v_i < 0$  时  $T_2$  管的工作情况

乙类互补推挽功率放大电路

OCL(Output Capacitor Less)电路

## 5.5 集成运放的输出级

25



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### 乙类互补对称功放

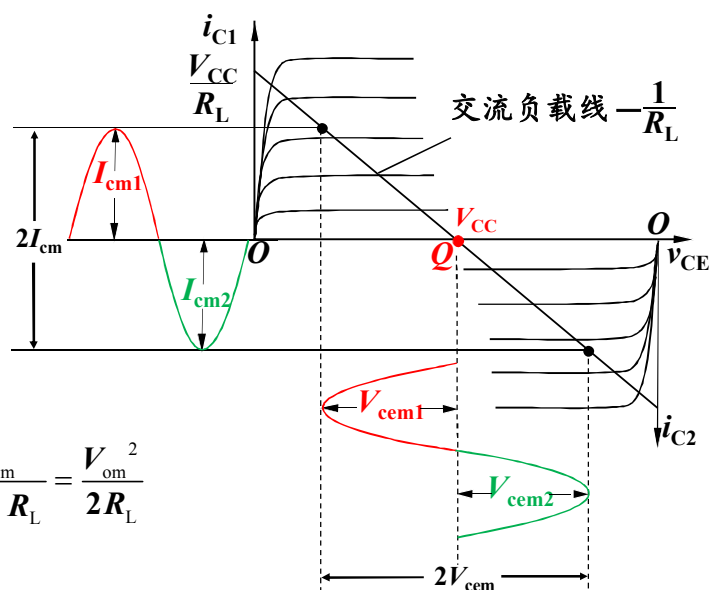
#### 2. 电路参数

最大输出功率  $P_{\text{omax}}$

$$P_{\text{omax}} = \frac{\left(\frac{V_{\text{CC}} - V_{\text{CES}}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_L} = \frac{(V_{\text{CC}} - V_{\text{CES}})^2}{2R_L}$$

忽略  $V_{\text{CES}}$  时  $P_{\text{omax}} \approx \frac{V_{\text{CC}}^2}{2R_L}$

实际输出功率  $P_o = V_o I_o = \frac{V_{\text{om}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{\text{om}}}{\sqrt{2} \cdot R_L} = \frac{V_{\text{om}}^2}{2R_L}$



## 5.5 集成运放的输出级

26



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### 乙类互补对称功放

#### 2. 电路参数

管耗  $P_T$

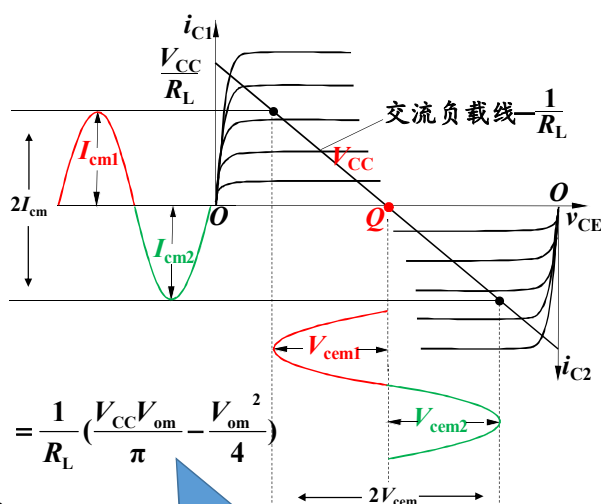
单个管子在半周期内的管耗

$$\begin{aligned} P_{T1} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{\text{CC}} - v_o) \frac{v_o}{R_L} d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{\text{CC}} - V_{\text{om}} \sin \omega t) \frac{V_{\text{om}} \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{V_{\text{CC}} V_{\text{om}}}{R_L} \sin \omega t - \frac{V_{\text{om}}^2}{R_L} \sin^2 \omega t \right) d(\omega t) = \frac{1}{R_L} \left( \frac{V_{\text{CC}} V_{\text{om}}}{\pi} - \frac{V_{\text{om}}^2}{4} \right) \end{aligned}$$

两管管耗  $P_T = P_{T1} + P_{T2} = \frac{2}{R_L} \left( \frac{V_{\text{CC}} V_{\text{om}}}{\pi} - \frac{V_{\text{om}}^2}{4} \right)$

什么条件下最大?

图解分析





## 5.5 集成运放的输出级

### ➤ 乙类互补对称功放

#### 2. 电路参数

电源供给的功率  $P_D$

$$P_D = P_o + P_T = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L}$$

当  $V_{om} \approx V_{CC}$  时,  $P_{Dm} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L}$

效率  $\eta$

$$\eta = \frac{P_o}{P_D} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{om}}{V_{CC}}$$

当  $V_{om} \approx V_{CC}$  时,  $\eta = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$

