

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！  
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！



## Part 4 放大电路的失真分析

## 放大电路有效放大的条件

### ○ 放大电路能够对输入信号有效放大的条件

在前一节我们学习的放大电路的分析方法，都是基于一个非常重要的前提——晶体管工作在放大区；

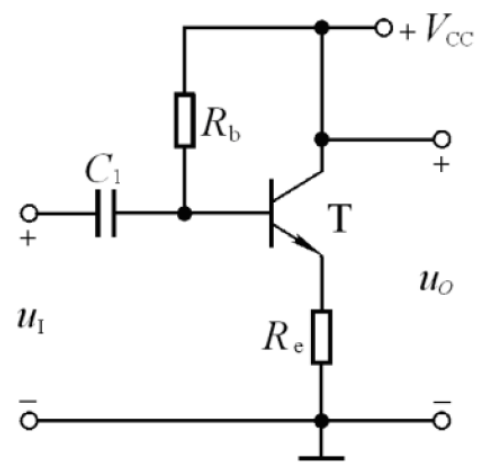
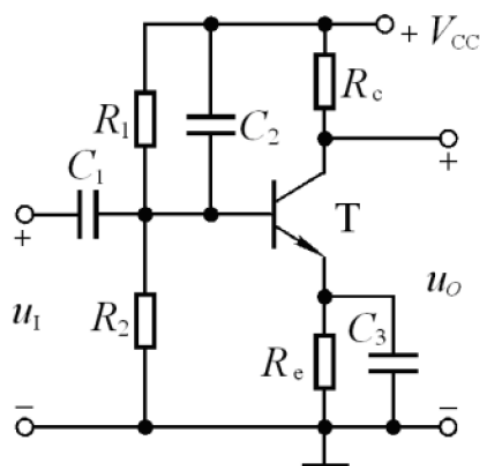
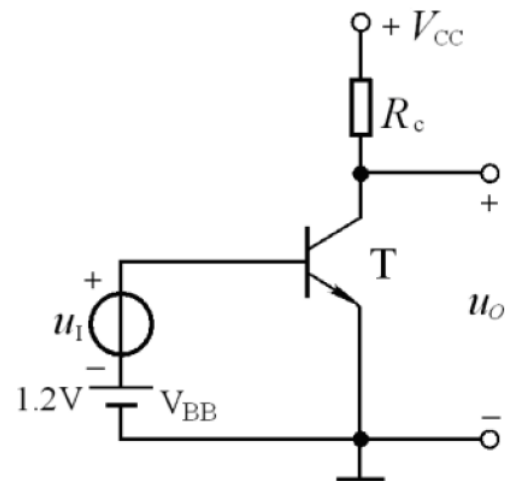
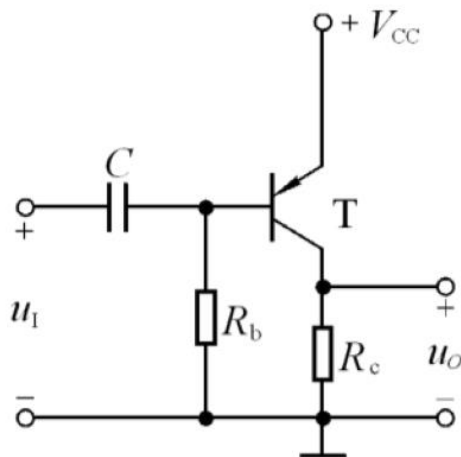
因此放大电路能够对输入信号进行有效放大的条件是：

- 静态工作点要设置合适，晶体管始终工作在放大区，不能截止或饱和；
- 除此之外，交流信号必须要能够输入、传递到放大电路中，且放大后的交流信号能够对外输出、传递给负载（或后级电路），即实现信号的“耦合”；

## 放大电路有效放大的条件

### 例 1

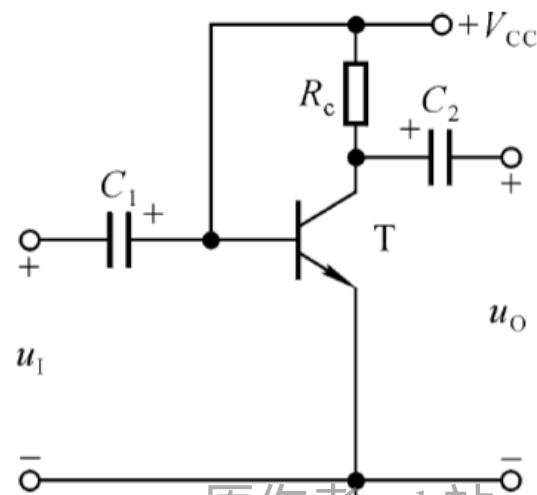
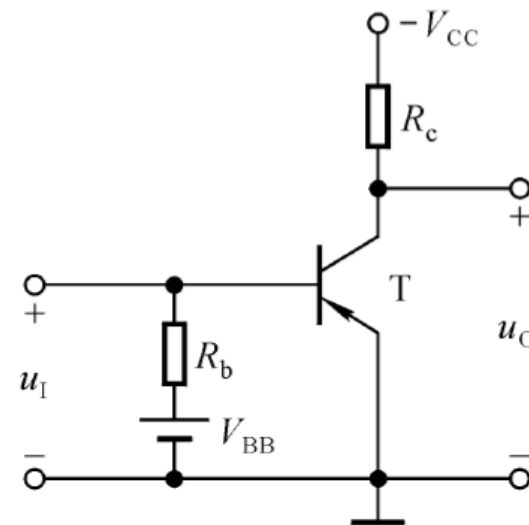
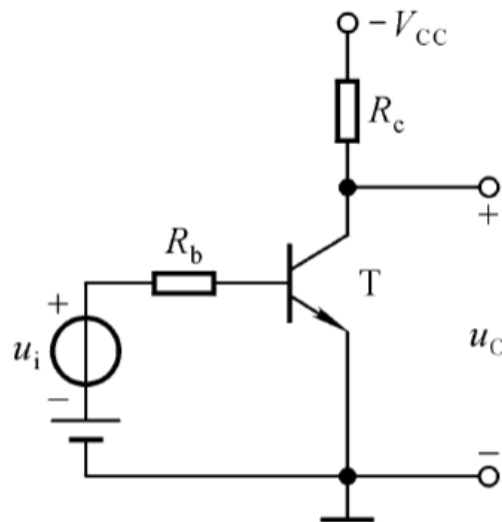
判断如图所示的各电路是否可能放大交流信号，并简述理由。



## 放大电路有效放大的条件

### 例 2

分别改正如图所示各电路中的错误，使它们有可能放大交流正弦波信号，要求不改变晶体管的型别以及电路自身的接法。



请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！  
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

## 放大电路有效放大的条件

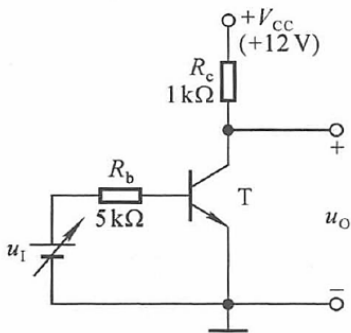
### 为什么要设置合适的静态工作点

回顾晶体管一节的例题：

#### 晶体管工作区的判断与划分

##### 例 3

已知如图所示的电路，晶体管  $\beta = 50$ ，导通时  $|U_{BEQ}| = 0.7 \text{ V}$ ，晶体管的饱和管压降  $|U_{CES}| = 0.3 \text{ V}$ ，试分析  $u_i$  为  $0 \text{ V}$ 、 $1 \text{ V}$ 、 $3 \text{ V}$  三种情况下，晶体管 T 的工作状态以及输出电压  $u_o$  的值。



静态工作点不合适，晶体管可能会工作在截止区或饱和区，无法保证对交流信号实现有效的放大，会出现输出信号波形的失真；

“失真”

信号在传输过程中与原有信号或标准信号相比所发生的偏差，

即输入为正弦波，  
输出不再为正弦波，  
波形出现了严重的畸变

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！  
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

## 放大电路的失真分析

### ○ 静态工作点设置不合适导致的两种失真

截止失真：由于输入回路无法满足发射结正偏，导致晶体管工作在截止区而引起的输出波形失真；

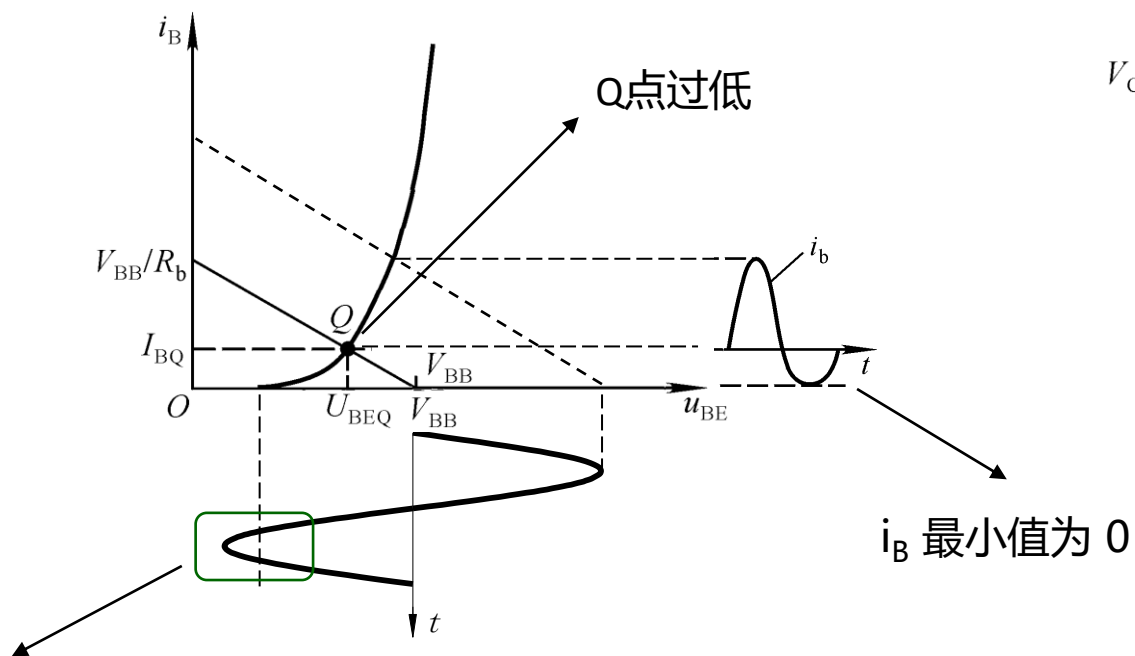
饱和失真：由于输出回路无法满足集电结反偏，导致晶体管工作在饱和区而引起的输出波形失真；

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！  
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

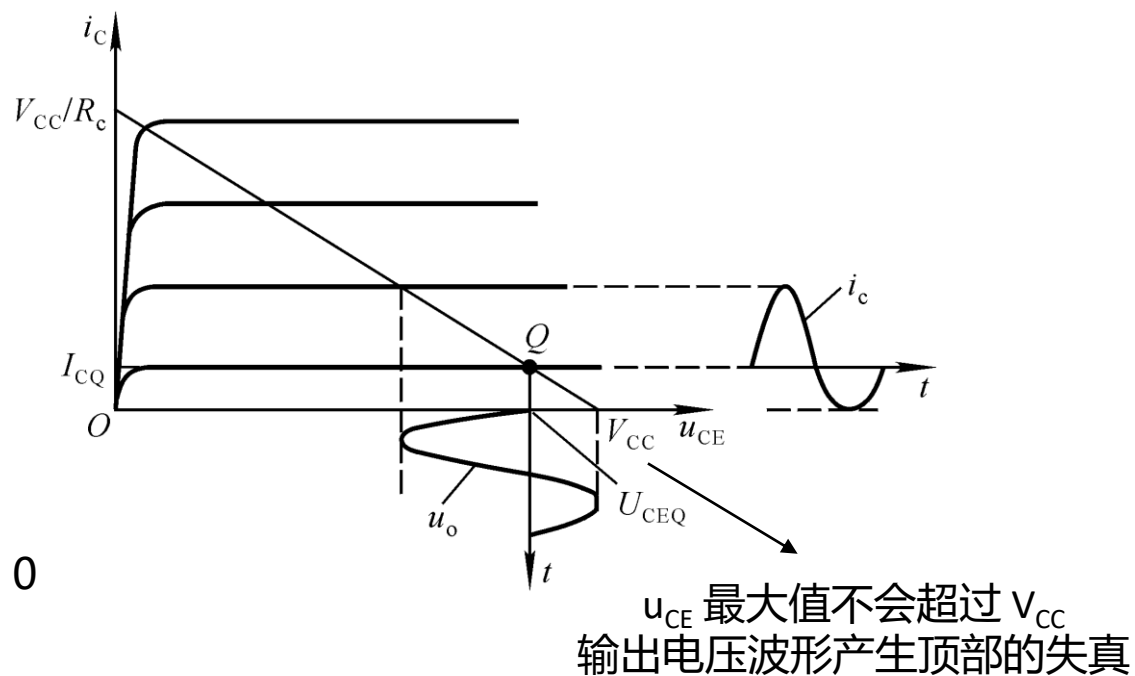
# 放大电路的失真分析

思考：如何调节电路参数消除截止失真？  
(增大基极静态电压，即增大 $V_{BB}$ )  
(只能从输入回路解决，提高Q点)

## 截止失真



$u_{BE}$  小于开启电压，晶体管工作在截止区



以NPN单管共射放大电路为例

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

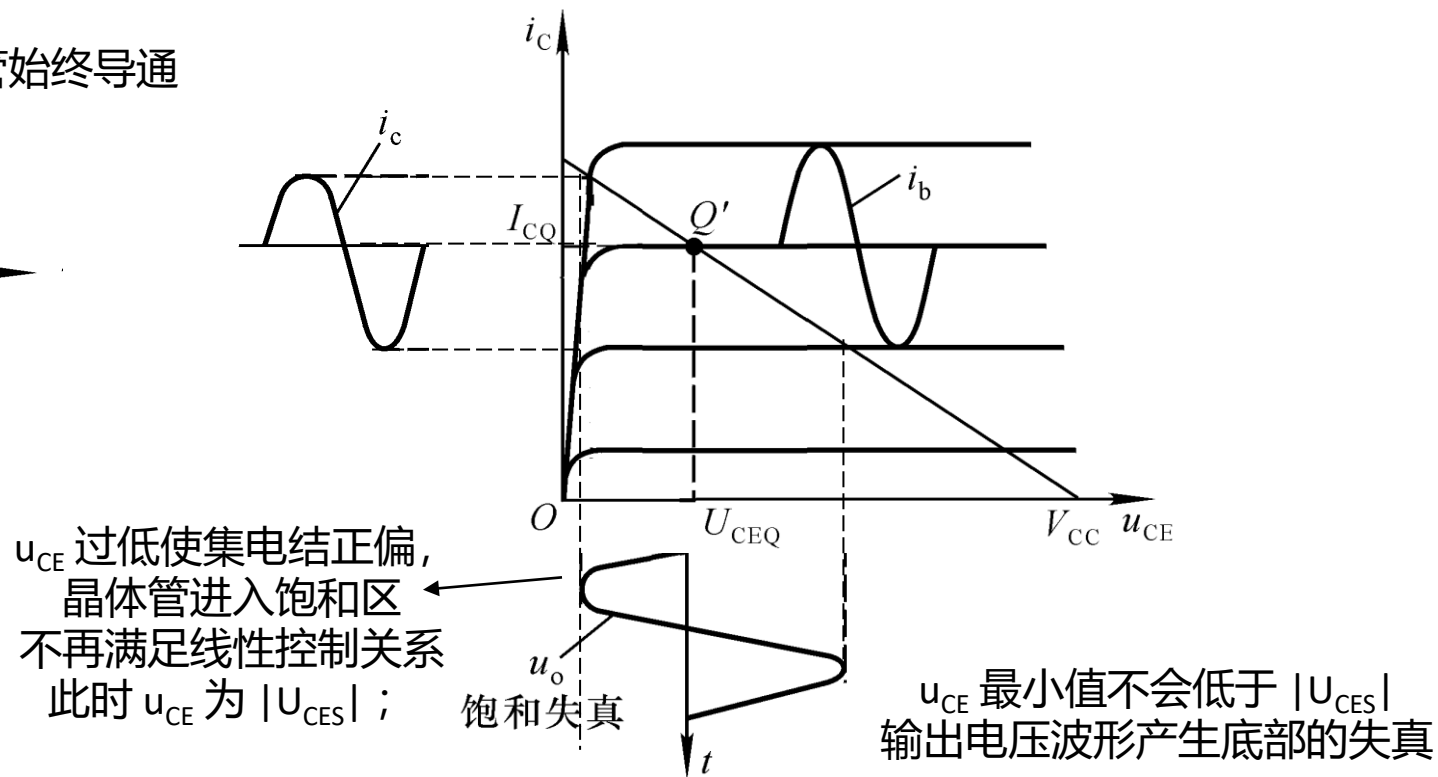
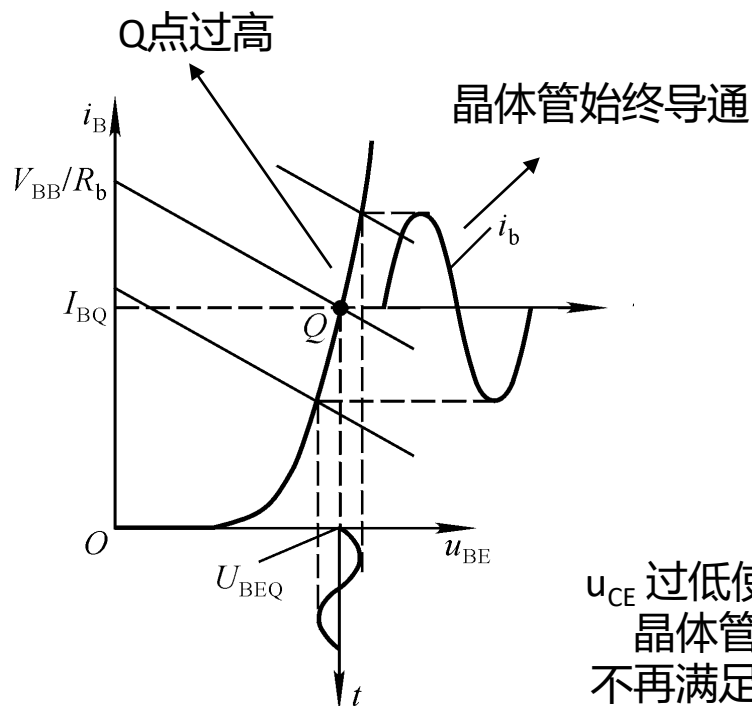
思考：如何调节电路参数消除饱和失真？

(增大基极电阻减小基极电流、  
更换  $\beta$  更小的管子减小集电极电流、  
减小集电极电阻增大管压降)

(既可以从输入回路也可以从输出回路解决，降低Q点)

## 放大电路的失真分析

### 饱和失真



以NPN单管共射放大电路为例

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

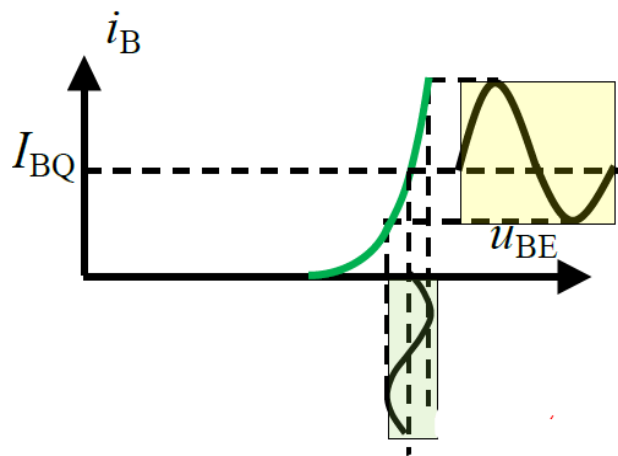


## 放大电路的失真分析

### ○ 放大电路中存在的另一种失真

需要注意的问题，截止失真与饱和失真都是由于静态工作点设置不合适导致的工作点不能满足在正常放大区范围内，这两种失真都可以称为“超范围失真”；这两种失真都是属于情况很严重、失真很明显，但是可以通过人为设置于调节避免的失真；

而一般提到的放大电路的非线性失真，通常指的是由于半导体元件自身固有的非线性特性导致的失真，例如前面图解法分析放大电路时的输入伏安特性曲线；这种非线性失真是固定存在无法消除的，但在小信号分析时不明显往往忽略；



## 放大电路的失真分析

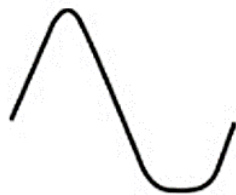
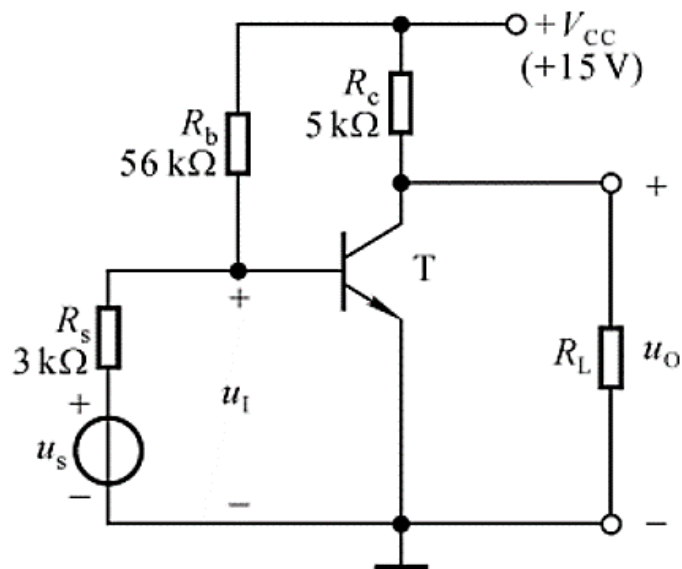
### ○ 截止失真与饱和失真对比总结

截止失真	饱和失真
Q点过低	Q点过高
输入回路发射结反偏，进入截止区	输出回路集电结正偏，进入饱和区
抬高Q点以改善 只能从输入回路解决	降低Q点以改善 既可以从输入回路解决， 也可以从输出回路解决
输出电压波形顶部失真	输出电压波形底部失真
以上结论为NPN型晶体管，PNP结论“反过来”即可	

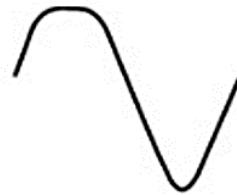
## 放大电路的失真分析

### 例 3

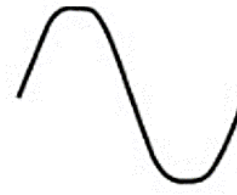
如图所示的电路中，当信号源电压为正弦波时，请分析输出电压波形分别为 (i)、(ii)、(iii) 时电路产生了什么失真？如何消除？



(i)



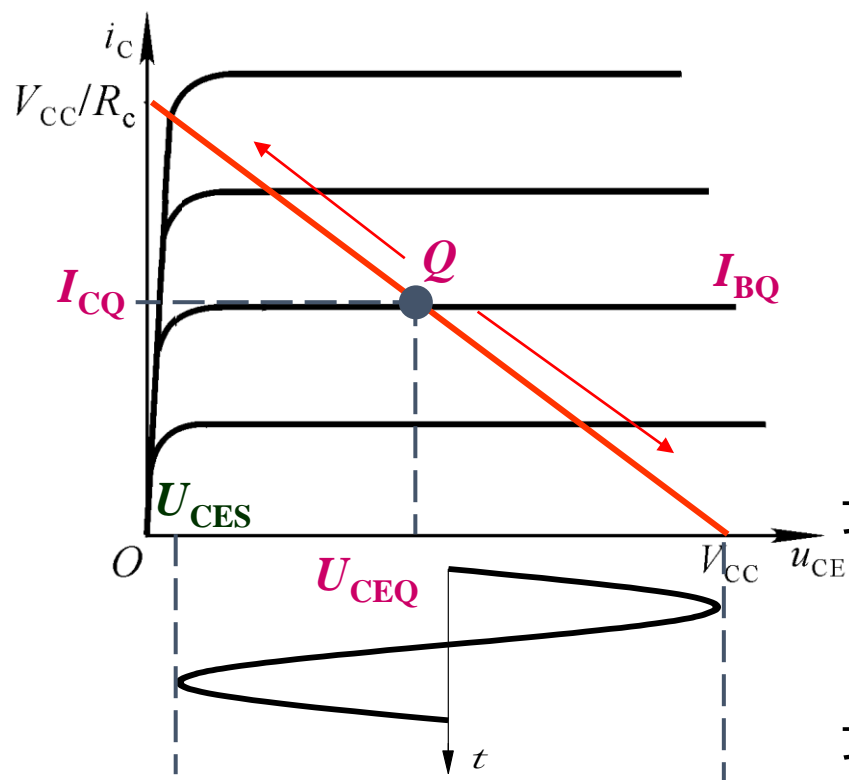
(ii)



(iii)

# 放大电路的失真分析

## 最大不失真输出电压



最大不失真输出电压  $U_{om}$  的定义是当输入电压再增大就会使输出电压产生非线性失真的极限输出电压的有效值；

最大不失真输出电压:  $U_{om} = \min \left\{ \frac{V_{CC} - U_{CEQ}}{\sqrt{2}}, \frac{U_{CEQ} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \right\}$

最合适的静态工作点： $U_{CEQ} = \frac{V_{CC} + U_{CES}}{2} \rightarrow$  此时  $U_{om}$  最大  
(从失真电压裕度角度)

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

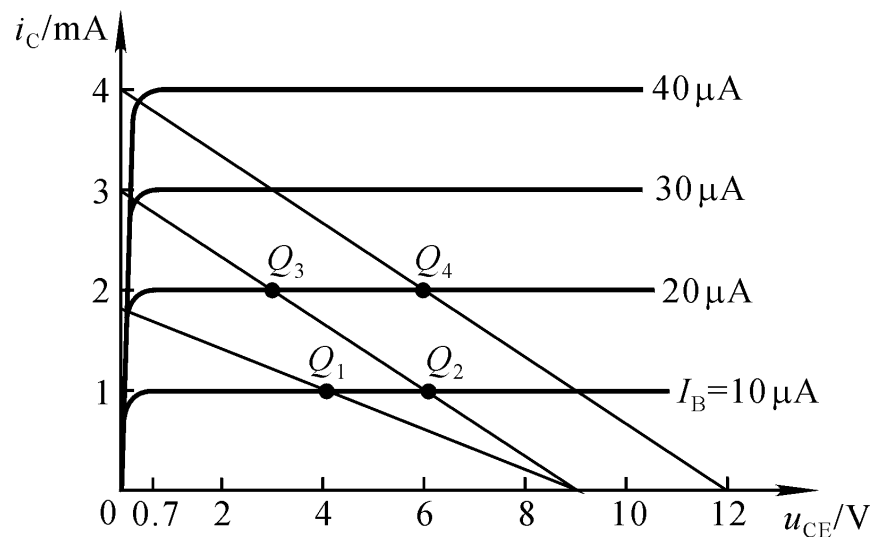
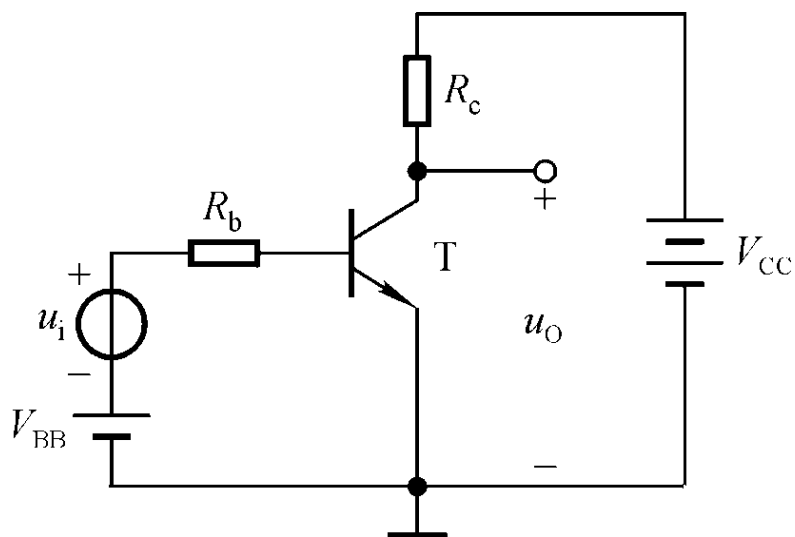
## 放大电路的失真分析

### 例 4

已知放大电路如图所示，由于参数的变化使静态工作点发生了  $Q_1 \sim Q_4$  的改变；

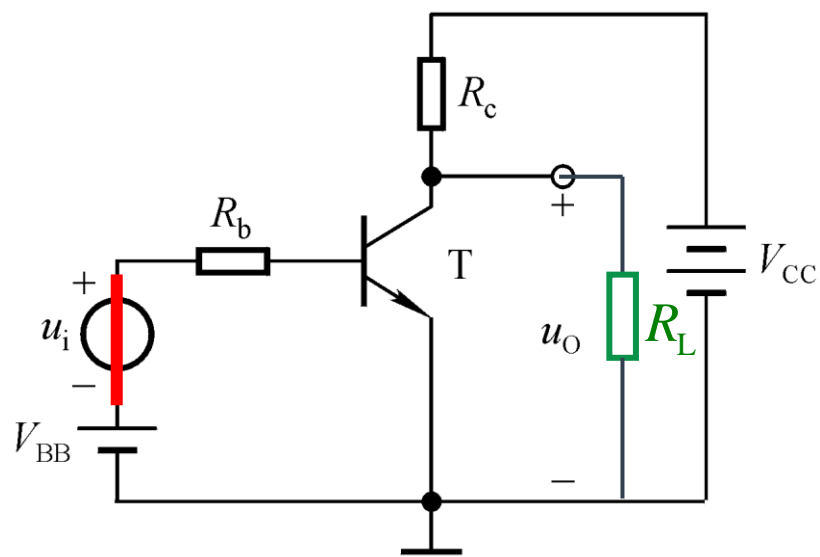
(1) 在什么参数如何变化时  $Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4$ ？

(2) 从输出电压上看，哪个  $Q$  点下最易产生截止失真？哪个  $Q$  点下最易产生饱和失真？  
哪个  $Q$  点下最大不失真输出电压  $U_{om}$  最大？



## 放大电路的失真分析

### ○ 直流负载对静态工作点的影响——估算法



当放大电路后级带有直流负载时，静态工作点的求解：

输入回路 —— 利用晶体管工作在放大区时  
 $|U_{BEQ}| = 0.7 \text{ V}$ ，则输入回路KVL：

$$V_{BB} = R_b I_{BQ} + U_{BEQ}$$

晶体管工作在放大区的电流关系：

$$I_{BQ} : I_{CQ} : I_{EQ} = 1 : \beta : 1 + \beta$$

输出回路KVL：

$$V'_{CC} = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC} \quad R'_c = R_c // R_L \quad \longleftarrow \quad U_{CQ} = V'_{CC} - R'_c I_{CQ} \quad U_{EQ} = 0$$

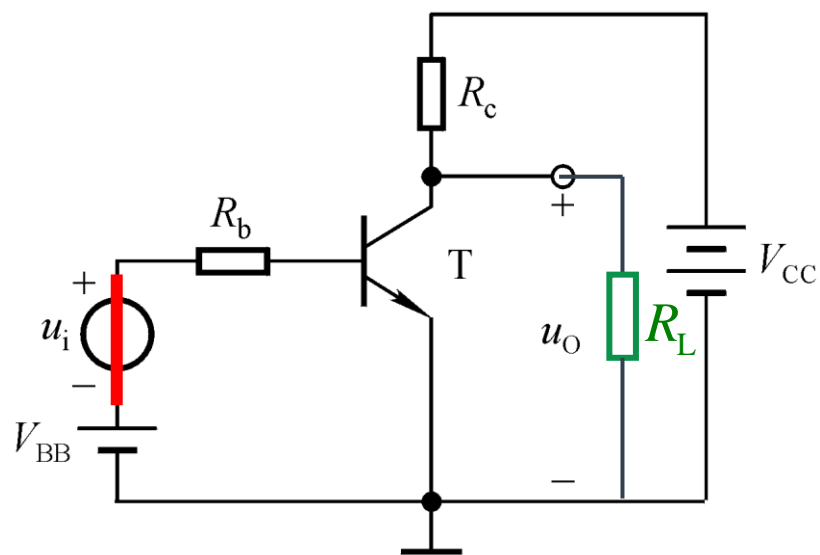
(根据戴维南等效定理求解)

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

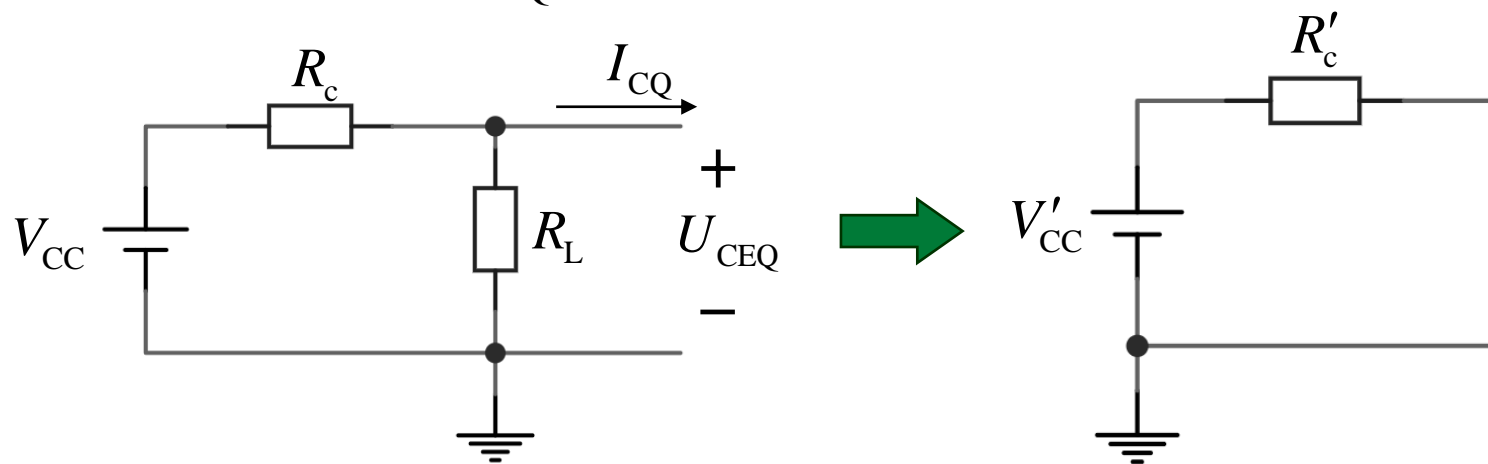
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！  
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

## 放大电路静态工作点的设置

### 直流负载对静态工作点的影响——估算法



输出回路KVL:  $U_{CQ} = V'_{CC} - R'_c I_{CQ}$      $V'_{CC} = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC}$   
 $U_{EQ} = 0$



即此时的输出回路电源外特性的  $u_{CE}$  和  $i_C$  直线发生了偏移  
原来为  $U_{CEQ} = V_{CC} - R_c I_{CQ}$ ，现在为  $U_{CEQ} = V'_{CC} - R'_c I_{CQ}$

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

不需要背下面的最大不失真输出电压的表达式，  
要理解是如何得到这个式子的！

## 放大电路的失真分析

### 直流负载对静态工作点的影响——图解法

红色的虚线为空载时的负载线，  
与输出伏安特性曲线交点为空载静态工作点 $Q_0$ ；

绿色的直线为带直流负载时的负载线，  
与输出伏安特性曲线交点为静态工作点 $Q$ ；

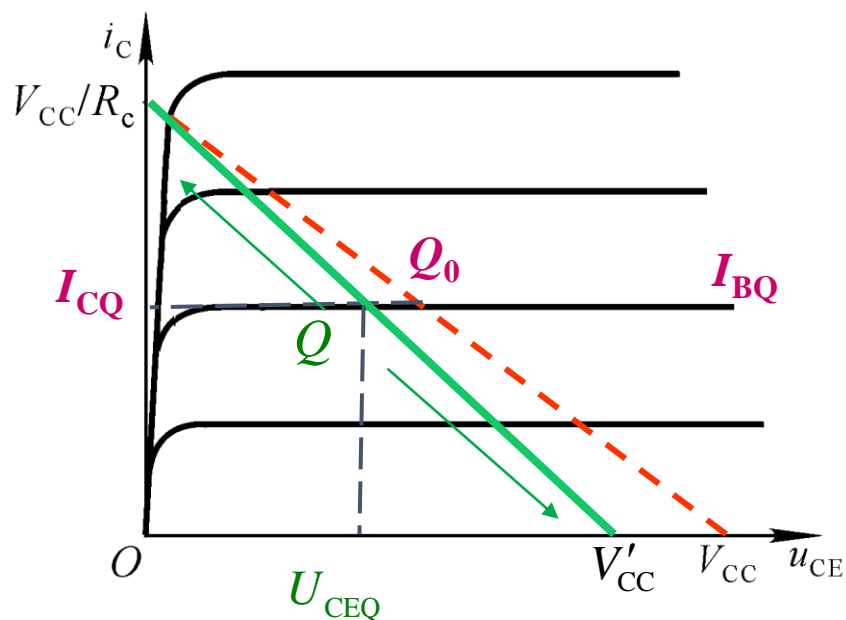
当带直流负载时，保证放大状态的 $u_{CE}$ 可设置范围变窄：

$$U_{CES} \sim \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC}$$

$$\text{最大不失真输出电压: } U_{om} = \min \left\{ \frac{V'_{CC} - U_{CEQ}}{\sqrt{2}}, \frac{U_{CEQ} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \right\}$$

上式又等价于：

$$U_{om} = \min \left\{ \frac{R'_c I_{CQ}}{\sqrt{2}}, \frac{U_{CEQ} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \right\}$$

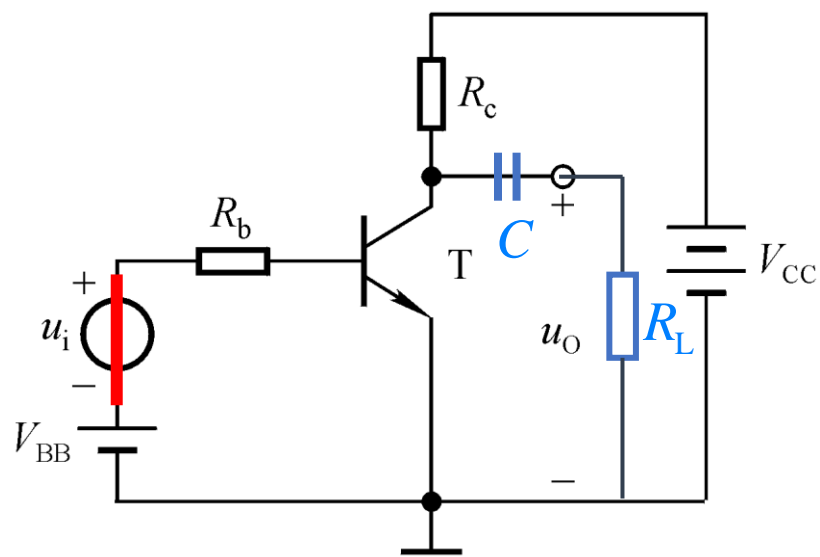


这里的  $U_{CEQ}$  指的是绿色的 $Q$   
即直流静态时带负载



## 放大电路的失真分析

### 交流负载对静态工作点的影响——估算法



交流负载指的是仅在交流通路中存在负载，而直流通路中保持空载，因此，在集电极输出端串联一个大电容  $C$ ，即可实现“隔直通交”，仅在交流通路中存在负载  $R_L$ ；因此直流静态与交流动态时输出回路的电路方程并不相同；

因为负载只在交流通路时存在，因此静态工作点的求解与空载时相同，即输出回路KVL仍然采用下式：

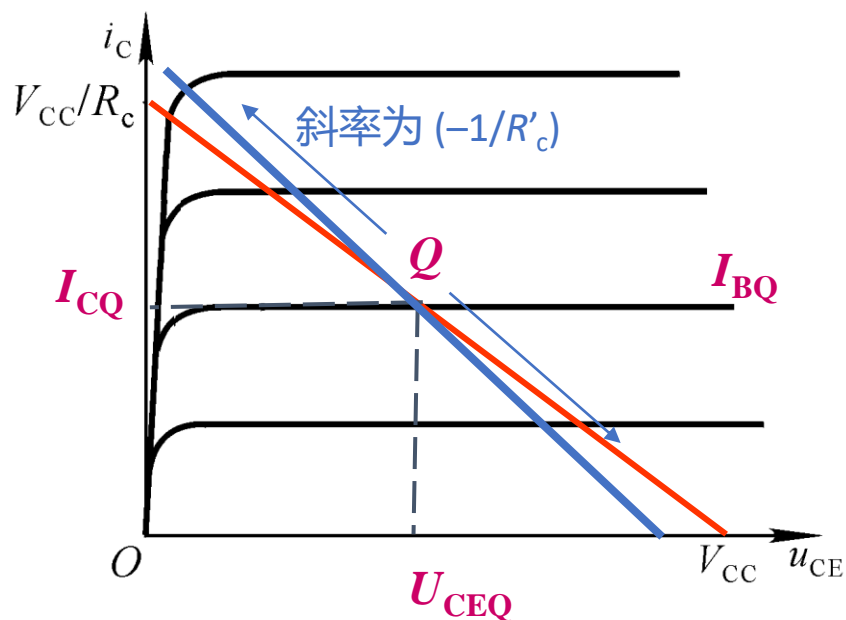
$$U_{CQ} = V_{CC} - R_c I_{CQ} \quad U_{EQ} = 0$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ}$$

不需要背下面的最大不失真输出电压的表达式，  
要理解是如何得到这个式子的！

## 放大电路的失真分析

### 交流负载对静态工作点的影响——图解法



红色的直线为直流负载线（对于本例即空载线）  
红色的直线与输出伏安特性的交点为静态工作点

当有交流信号输入时，由于此时电路存在交流负载，  
此时变化量的关系为

$$\Delta u_{ce} = -R'_c \Delta i_c$$

即输出电压全响应要按照蓝色的交流负载线移动

当带交流负载时，保证放大状态的  $u_{CE}$  可设置范围变窄：

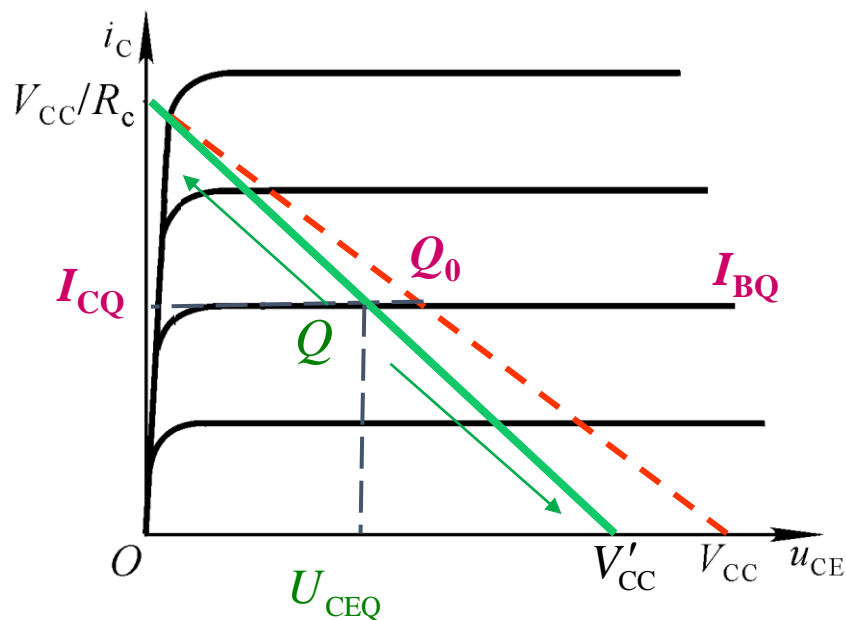
$$U_{CES} \sim U_{CEQ} + I_{CQ} R'_c$$

这里的  $U_{CEQ}$  指的是红色的  $Q$   
即直流静态时空载

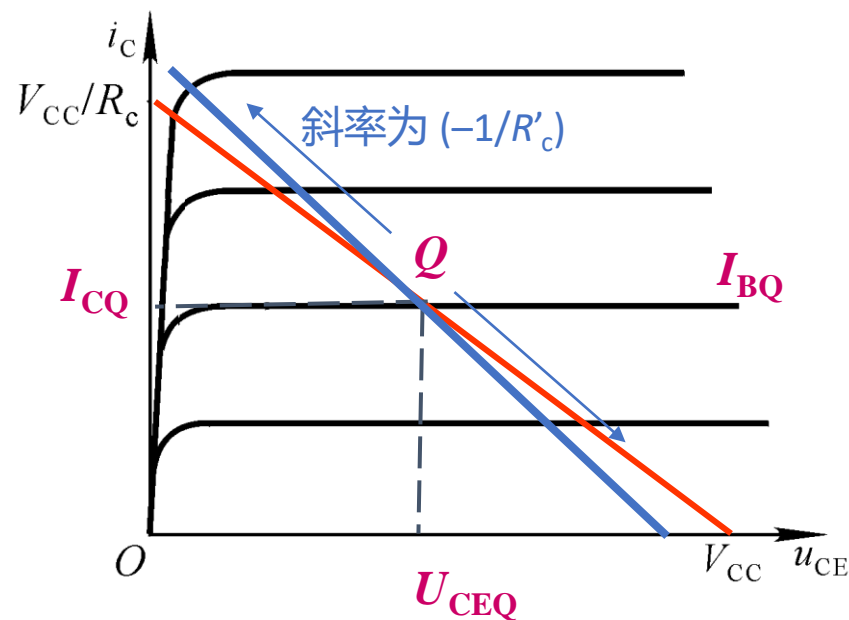
最大不失真输出电压： $U_{om} = \min \left\{ \frac{R'_c I_{CQ}}{\sqrt{2}}, \frac{U_{CEQ} - U_{CES}}{\sqrt{2}} \right\}$   
原作者：站up主这个xjmo不太冷

## 放大电路的失真分析

### ○ 直流负载与交流负载对静态工作点的影响——小结



直流负载同时也是交流负载  
即交流负载线并未画出，红色线为空载线仅作为对比  
绿色线既是直流负载线又是交流负载线



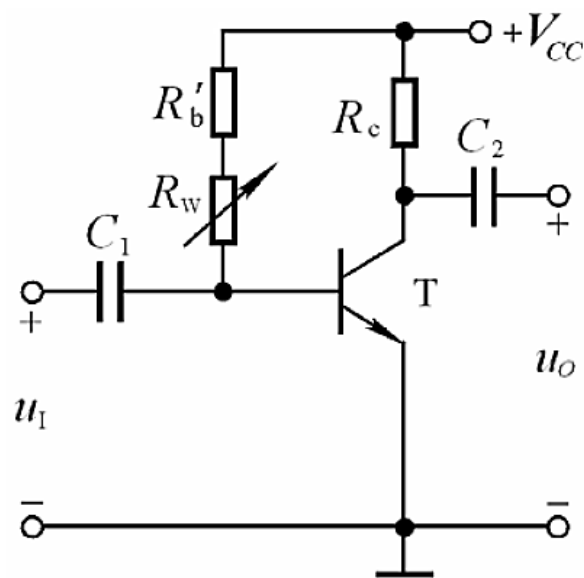
红色直流负载线同时为空载时的负载线  
直流负载线与交流负载线不是同一条  
即交流信号输入时全响应从Q点出发沿蓝色移动

## 放大电路的失真分析

### 例 5

已知如图所示的电路中， $V_{CC} = 12\text{ V}$ ， $R_c = 3\text{ k}\Omega$ ，静态管压降  $U_{CEQ} = 6\text{ V}$ ；**并在输出端加负载电阻  $R_L$ ，其阻值为  $3\text{ k}\Omega$ （图中未画出）**。回答下列问题：

- (1)该电路的最大不失真输出电压有效值  $U_{om}$  为多少？
- (2)若在不失真的条件下，减小  $R_w$ ，则输出电压的幅值将如何变化？
- (3)假设当  $U_i = 1\text{ mV}$  时，此时电路的输出刚好不失真，若此时增大输入电压，则输出电压的波形将会发生顶部失真还是底部失真？
- (4)若发现电路出现饱和失真，则为了消除失真，可以采取什么措施？



## 小结

- 放大电路能够实现有效放大的两个条件（静态、动态）
- 截止失真与饱和失真
  - 导致放大电路产生截止失真和饱和失真的原因；
  - 截止失真和饱和失真的波形特点；
  - 如何消除截止失真和饱和失真；
- 理解最大不失真输出电压的概念

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！  
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！



谢谢！

原作者：b站up主—这个ximo不太冷