



第九章 分立元件放大电路

- 9.1 放大概述
- 9.2 放大电路的组成和工作原理
- 9.3 放大电路的分析方法
- 9.4 常用单管放大电路
- 9.5 频率特性和其它*



9.5 放大电路的频率特性简介*

9.6 多级放大电路简介*

9.7 差分放大电路简介*

9.8 互补对称功率放大电路*



放大电路的频率响应

1. 为什么要讨论频率特性?

放大电路中要放大的信号往往包含多种频率成分，由于电路中存在电抗性元件，使得电路对不同频率的信号放大的能力不一样，输出信号就不能重现输入的波形（失真）。

2. 放大电路的频率特性（频率响应）

幅频特性

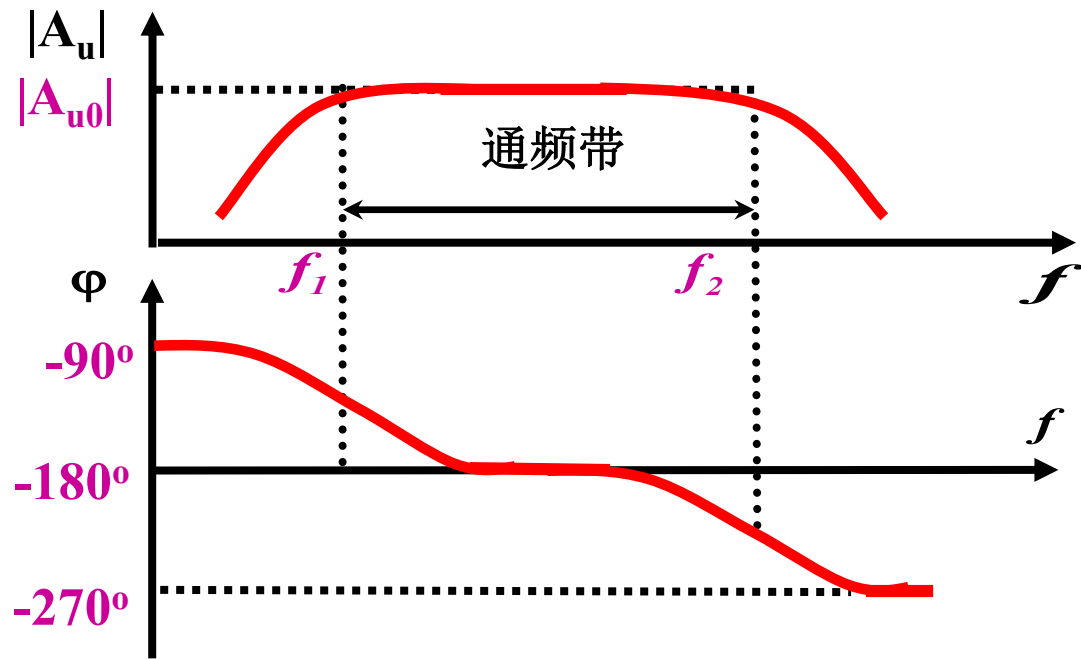
电压放大倍数的模 $|A_u|$ 与频率 f 的关系

相频特性

输出电压相对于输入电压的相位差 φ 与频率 f 的关系



放大电路的频率特性



中频段： $|A_{u0}|$ 与频率无关 低频段，高频段： $|A_u|$ 下降

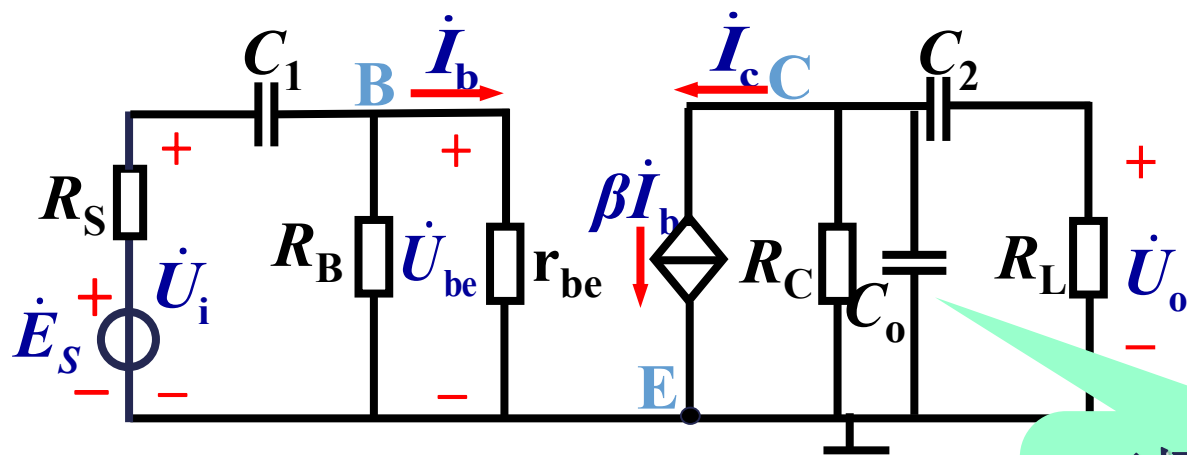
上限/下限频率： $|A_u|$ 下降至中频的0.707倍时所对应的频率

通频带： 下限至上限频率之间的频率范围



产生原因

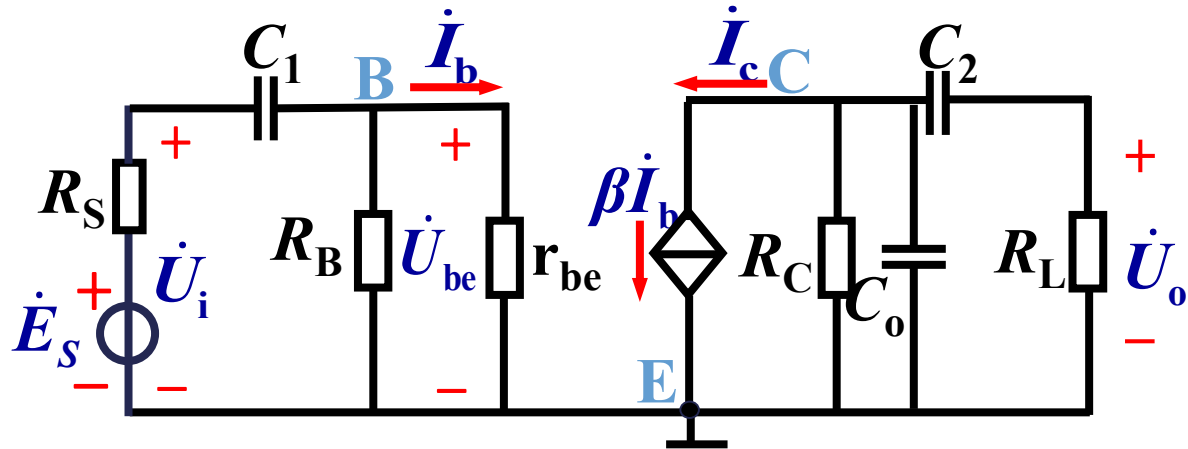
在放大电路中一般有耦合电容、旁路电容、晶体管极间电容、连线分布电容的存在，其容抗值随频率的变化而变化，所以放大电路对不同的频率信号在幅度和相位上所产生的放大效果不同。



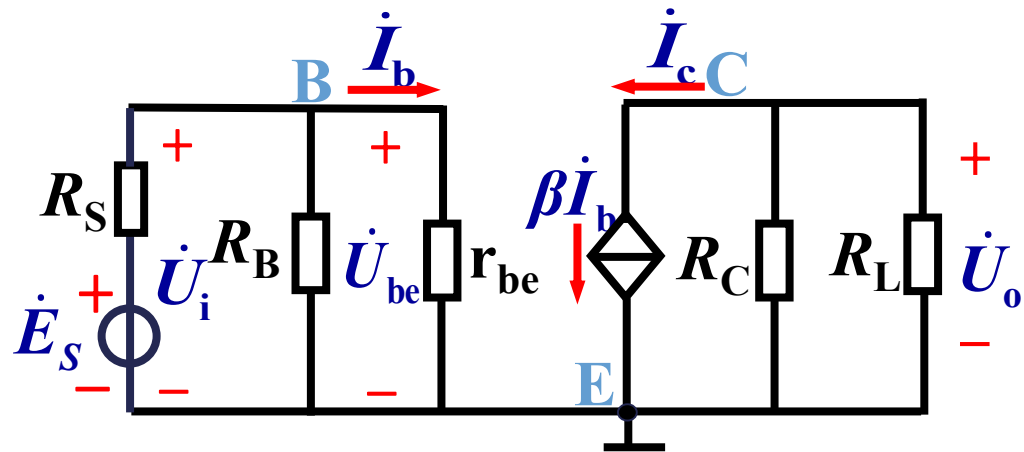
三极管的极间电容和导线的分布电容的等效电容 C_0



在中频段的等效电路

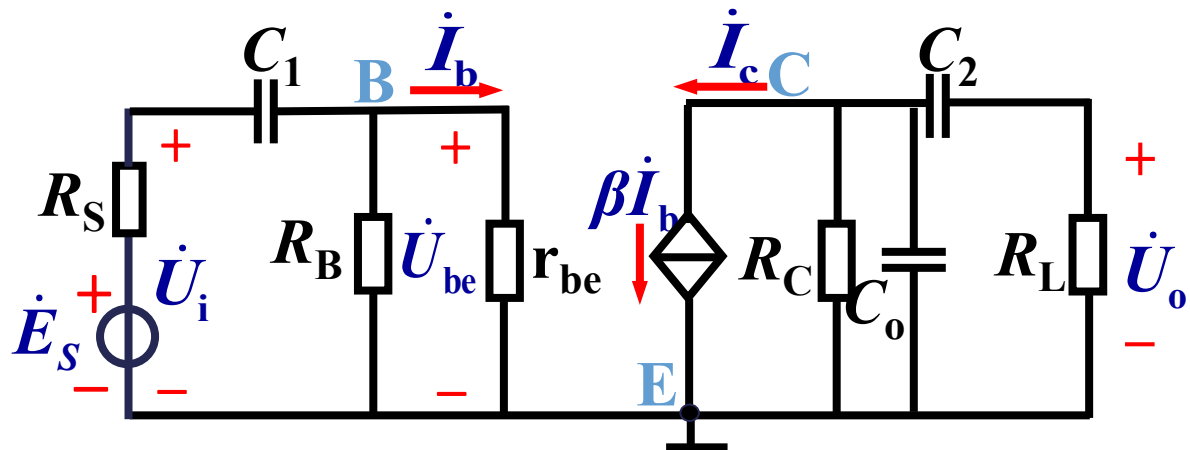


等效电路

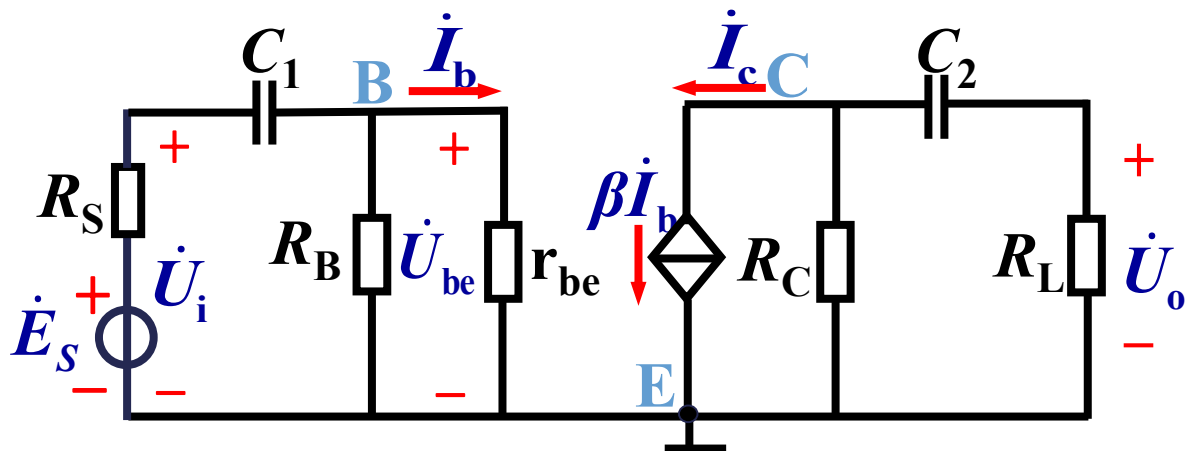




在低频段的等效电路



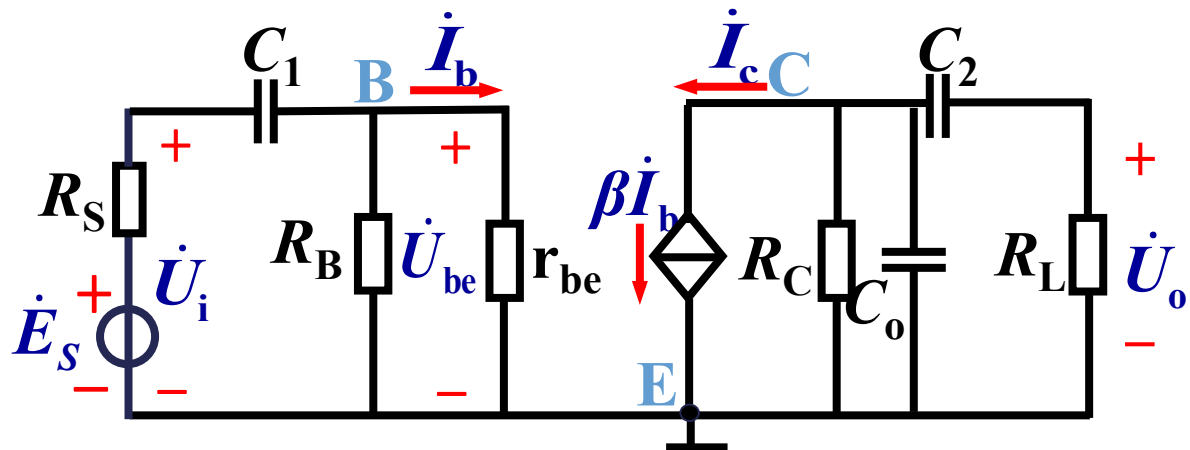
等效电路



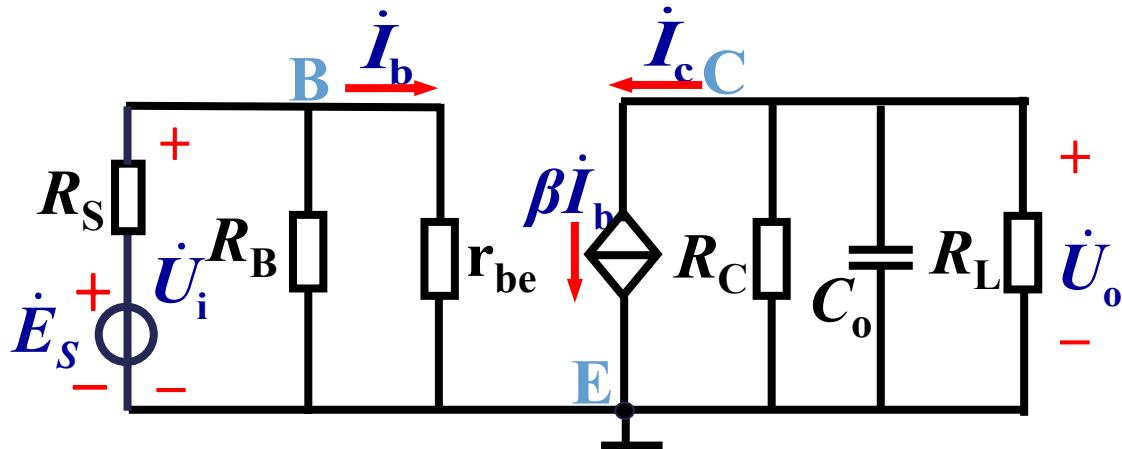
实际送到三极管输入端的电压比输入信号要小，放大倍数降低



在高频段的等效电路



等效电路

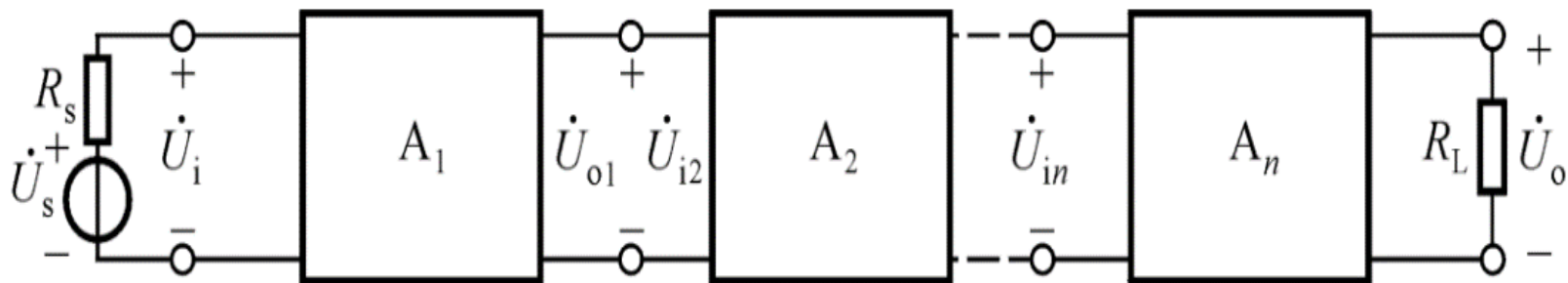


C_0 与负载并联，使总负载阻抗减小，因而使输出电压减小



多级放大电路

实际应用中，常对放大电路的性能提出多方面的要求。需要选择多个基本放大电路，并将他们合理连接，从而构成多级放大电路。



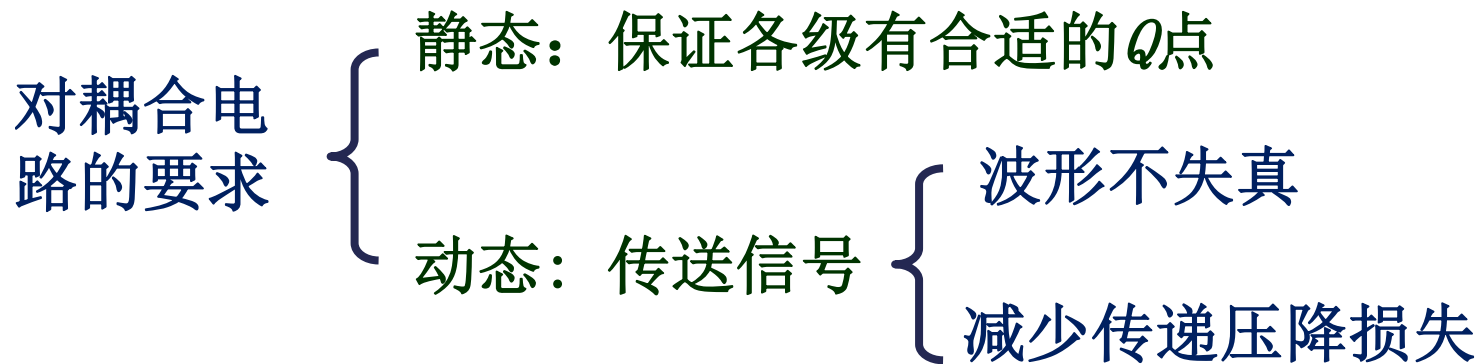
多级放大电路方框图

$$\dot{A}_u = \prod_{j=1}^N \dot{A}_{uj} \quad R_i = R_{i1} \quad R_o = R_{oN}$$



耦合

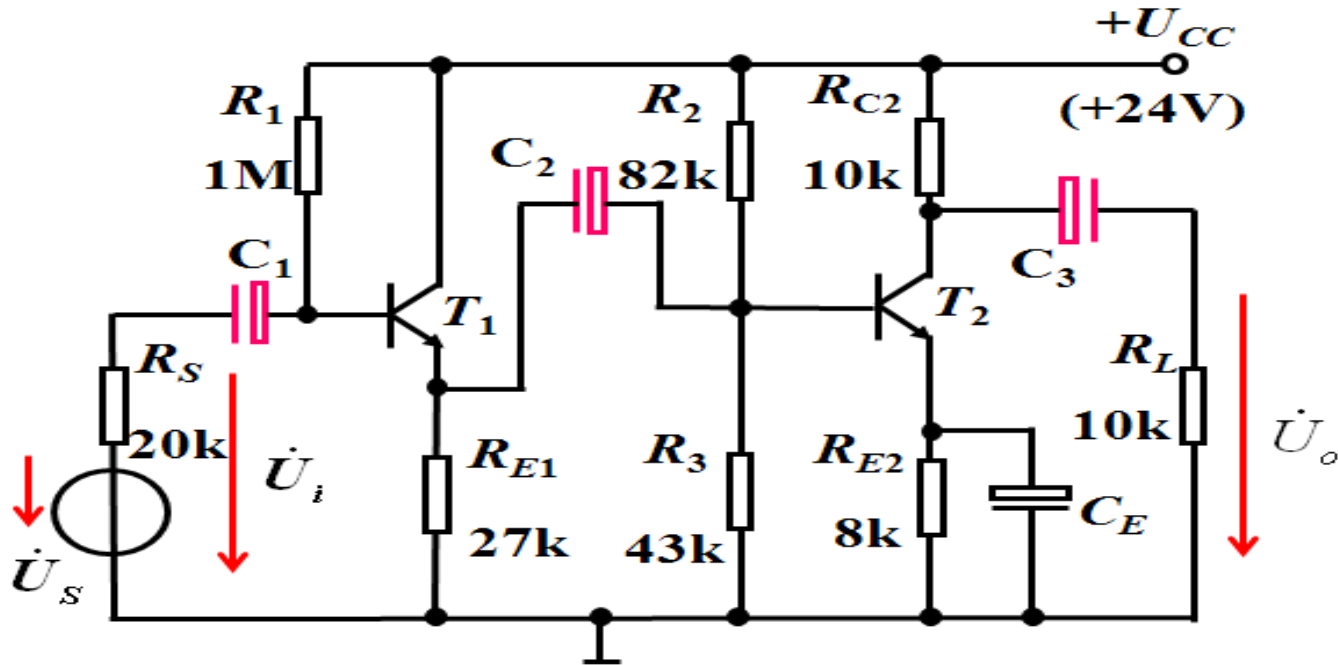
耦合：级与级之间的连接方式



常见的耦合方式有直接耦合、阻容耦合、变压器耦合、光电耦合



阻容耦合电路



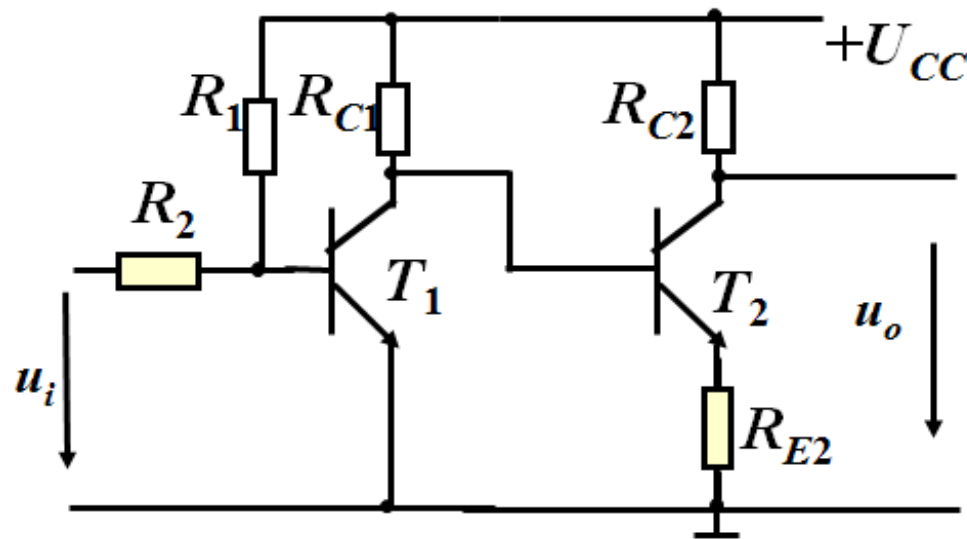
优点：Q点相互独立，利于电路的分析、设计和调试

缺点：低频特性差，不能放大缓慢变化信号，大电容制造困难，不易于集成

应用：分立元件电路



直接耦合电路



有良好的低频特性；能够放大缓慢的变化的信号，易于集成

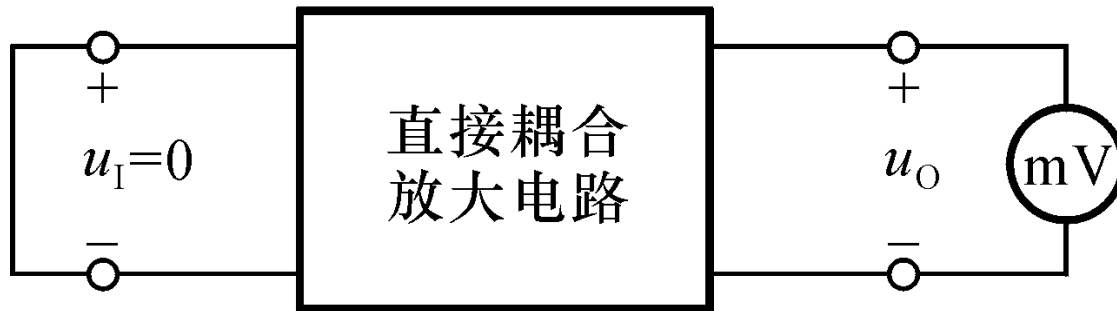
集成电路所采用

Q点相互影响，不利于电路的分析、设计和调试

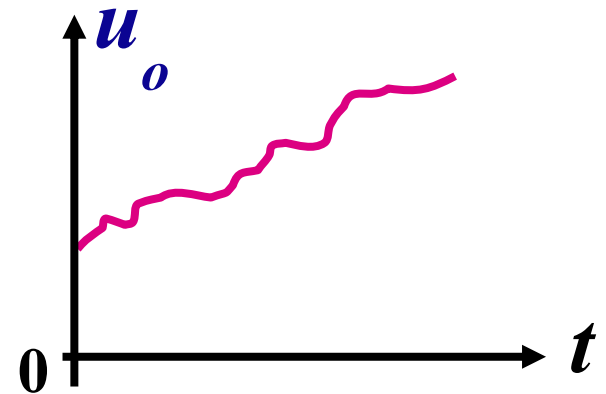
有零点漂移现象 ?



零点漂移现象



当 u_i 等于零时, u_o 不等于零





产生零点漂移现象的原因

电源电压的波动、元件的老化
半导体元件参数随温度变化



放大电路的工作点改变



经多级传递，逐级放大



输出电压的漂移

零点漂移又称
为温度漂移，
简称温漂



零点漂移的危害和衡量指标

直接影响对输入信号测量的准确程度和分辨能力。严重时可能淹没有效信号电压，无法分辨是有效信号电压还是漂移电压。

衡量指标

输出漂移电压折合到输入端的等效漂移电压

输入端等效
漂移电压

$$u_{id} = \frac{u_{od}}{A_u}$$

输出端
漂移电压

只有 u_{id} 比输入信号小许多时，放大后的有用信号才能被很好地区分



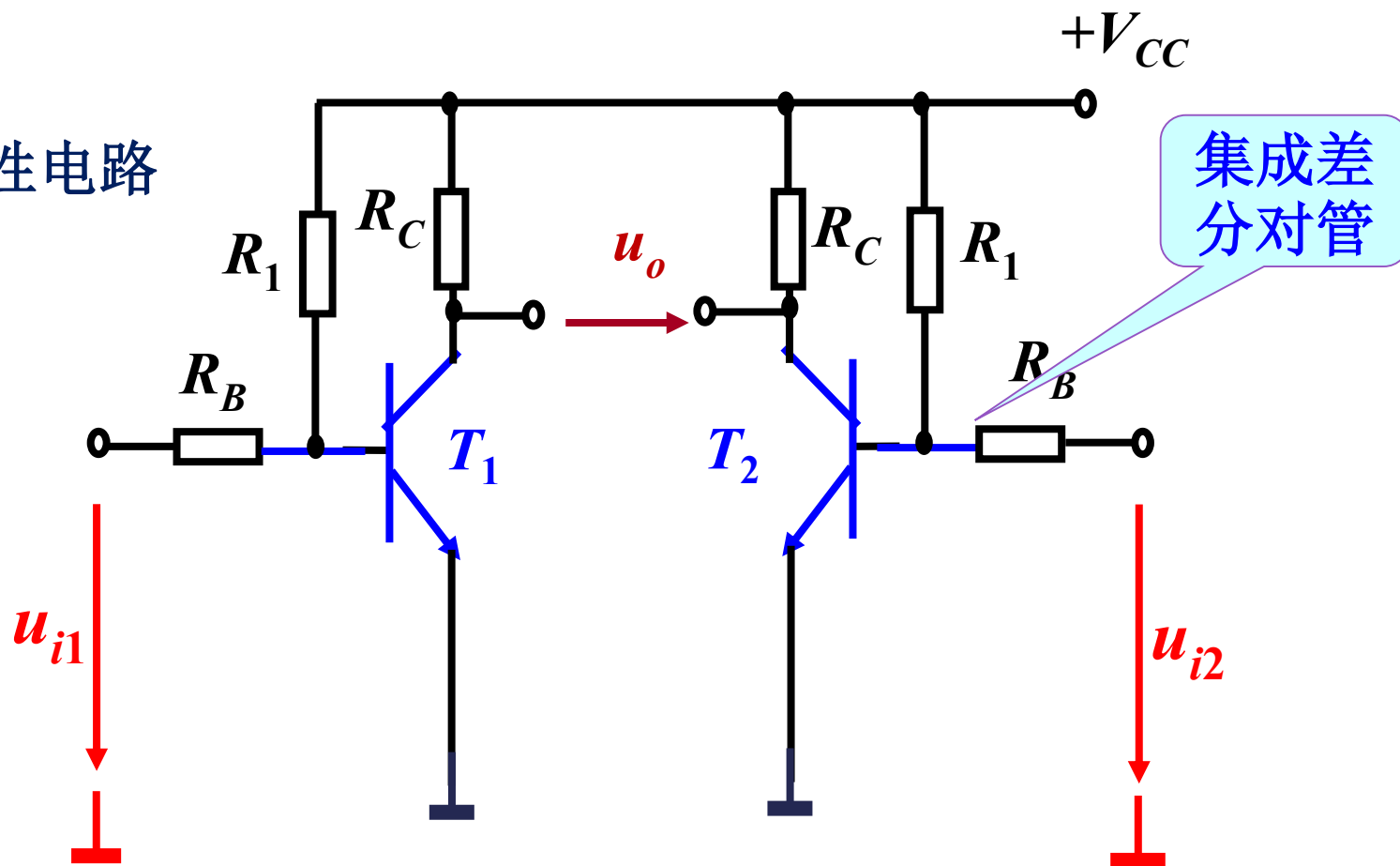
如何抑制零点漂移

1. 在电路中引入直流负反馈，例静态工作点稳定电路
 2. 采用温度补偿的方法，利用热敏元件来抵消放大管参数的变化
 3. 采用特性相同的管子，使它们的温漂相互抵消，构成“差分放大电路”
- 广泛用于集成电路中



差分放大电路

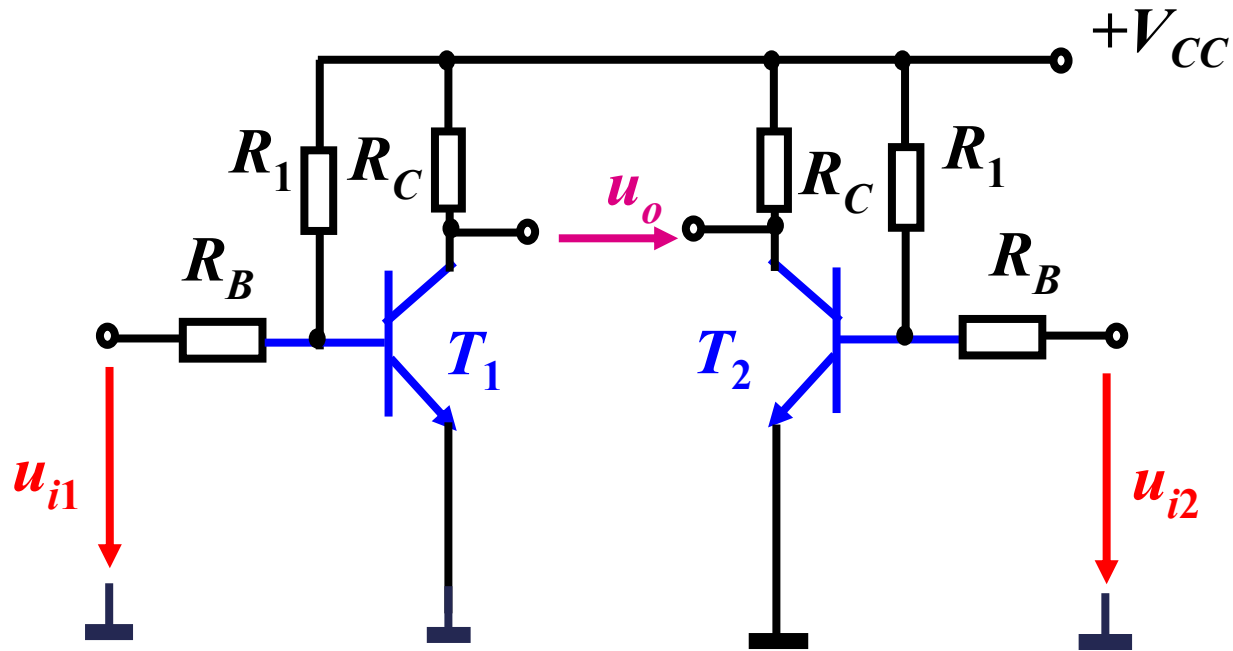
原理性电路



特点：结构及参数对称



差分放大电路抑制零漂的原因



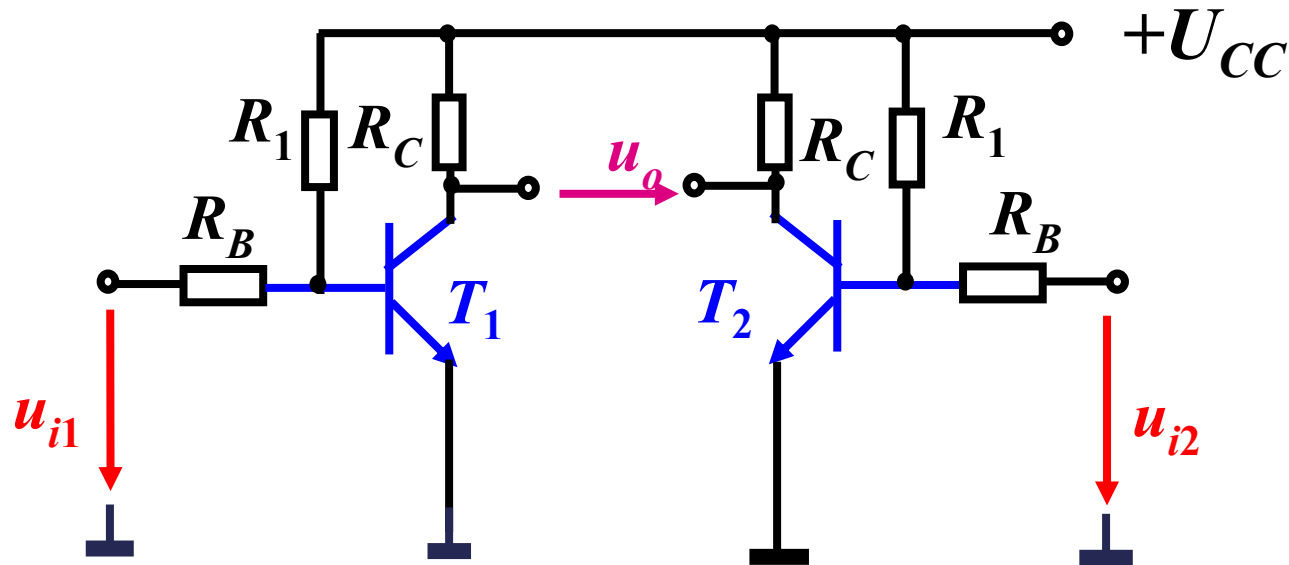
当 $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 时: $u_o = U_{C1} - U_{C2} = 0$

当温度变化时:

$$u_o = (U_{C1} + \Delta u_{C1}) - (U_{C2} + \Delta u_{C2}) = 0$$



共模信号输入情况



共模信号 $u_{i1} = u_{i2} = u_C$ (大小相等, 极性相同的信号)

理想情况: $u_{i1} = u_{i2} \rightarrow u_{C1} = u_{C2} \rightarrow u_o = 0$

共模电压放大倍数: $A_C = \frac{u_o}{u_C}$ (为零)

实际情况因两侧不完全对称, $u_o \neq 0$, 但很小

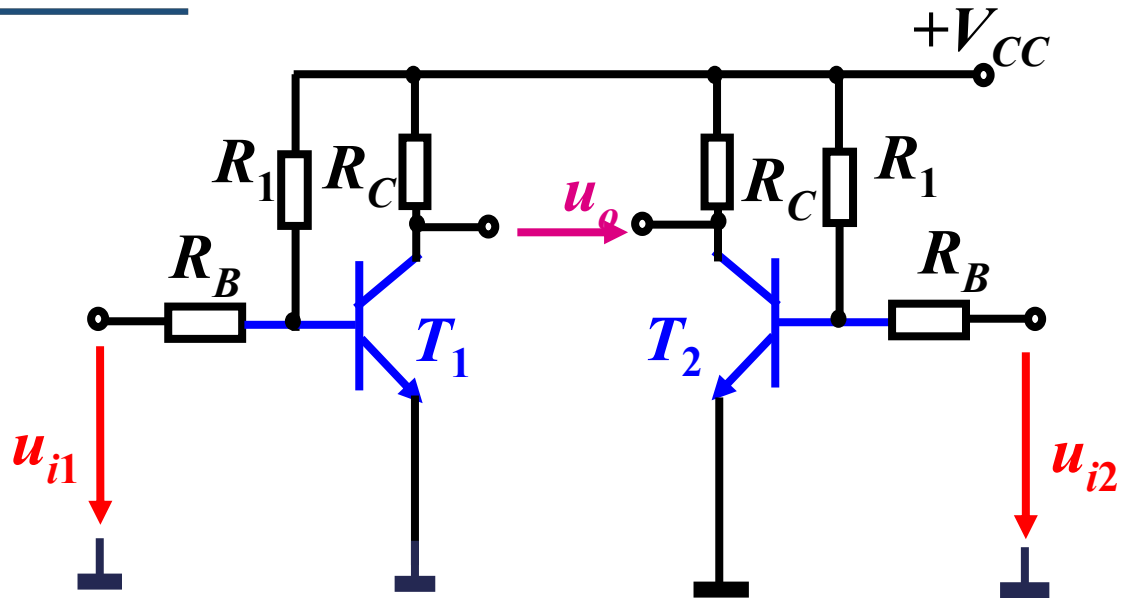


差模信号输入情况

差模信号

$$u_{i1} = -u_{i2} = u_d$$

大小相等，极性相反



$$\text{设 } u_{C1} = U_{C1} + \Delta u_{C1}, \quad u_{C2} = U_{C2} + \Delta u_{C2}$$

$$\text{因 } u_{i1} = -u_{i2}, \rightarrow \Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}, \text{ 等量异向}$$

$$\rightarrow u_o = u_{C1} - u_{C2} = \Delta u_{C1} - \Delta u_{C2} = 2\Delta u_{C1}$$

差模电压放大倍数:

$$A_d = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{\Delta u_{C1}}{u_d}$$

单管的 A_u



任意信号输入情况

可分解为共模分量和差模分量

例: $u_{i1} = 10 \text{ mV}$, $u_{i2} = 6 \text{ mV}$

可分解成:

$$u_{i1} = 8 \text{ mV} + 2 \text{ mV}$$

$$u_{i2} = 8 \text{ mV} - 2 \text{ mV}$$

The diagram illustrates the decomposition of input signals u_{i1} and u_{i2} into common-mode and differential-mode components. It features two overlapping circles on a light blue background. The left circle is labeled '共模信号' (Common-mode signal) and the right circle is labeled '差模信号' (Differential-mode signal). The equations for the decomposition are:

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

共模信号 差模信号



共模抑制比(Common Mode Rejection Ratio, CMRR)

$$K_{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{衡量差放对差模信号的分辨能力}$$

$$K_{CMR}(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (\text{分贝})$$

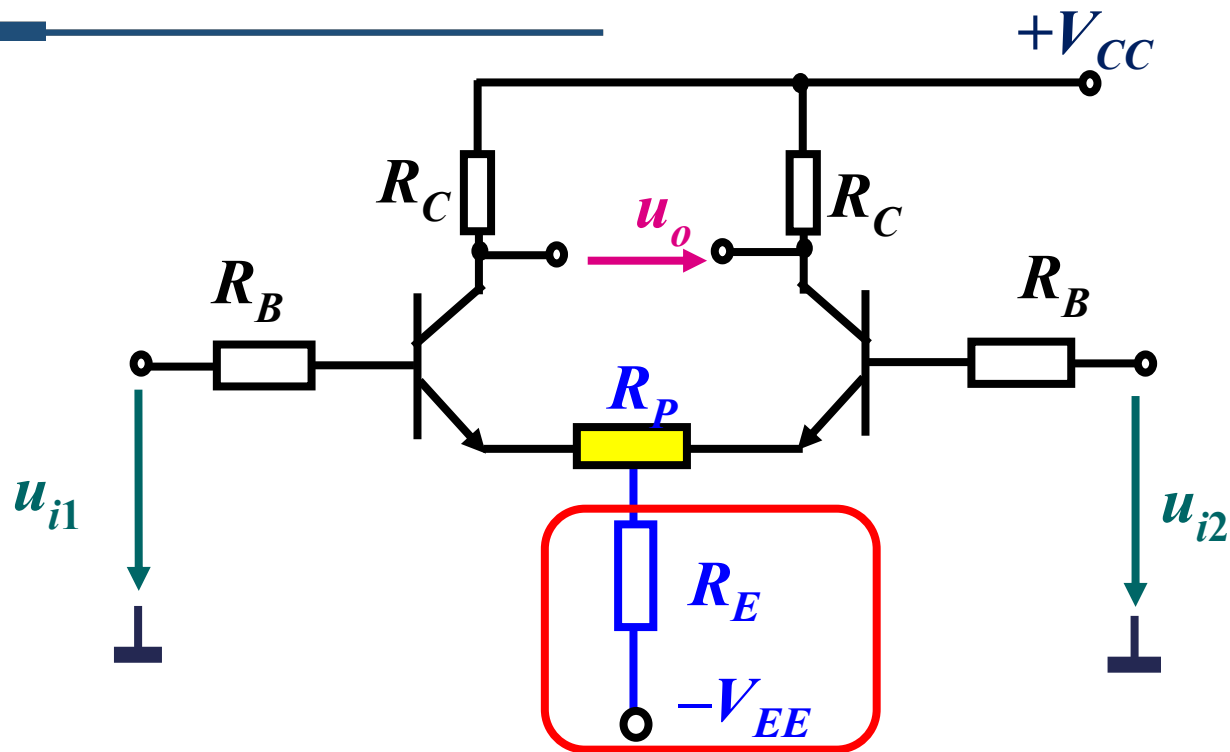
越大，对差模信号的分辨能力大，对共模信号的抑制能力强

$$\text{例: } A_d = -200, \quad A_c = 0.1$$

$$K_{CMR} = 20 \lg |(-200) / 0.1| = 66 \text{ dB}$$

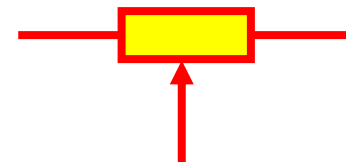


典型电路---双电源长尾式差放



特点：加入射极电阻 R_E 和负电源 $-V_{EE}$ 采用正负双电源供电

为了使左右平衡，可设置小阻值调零电位器，分析计算时可忽略

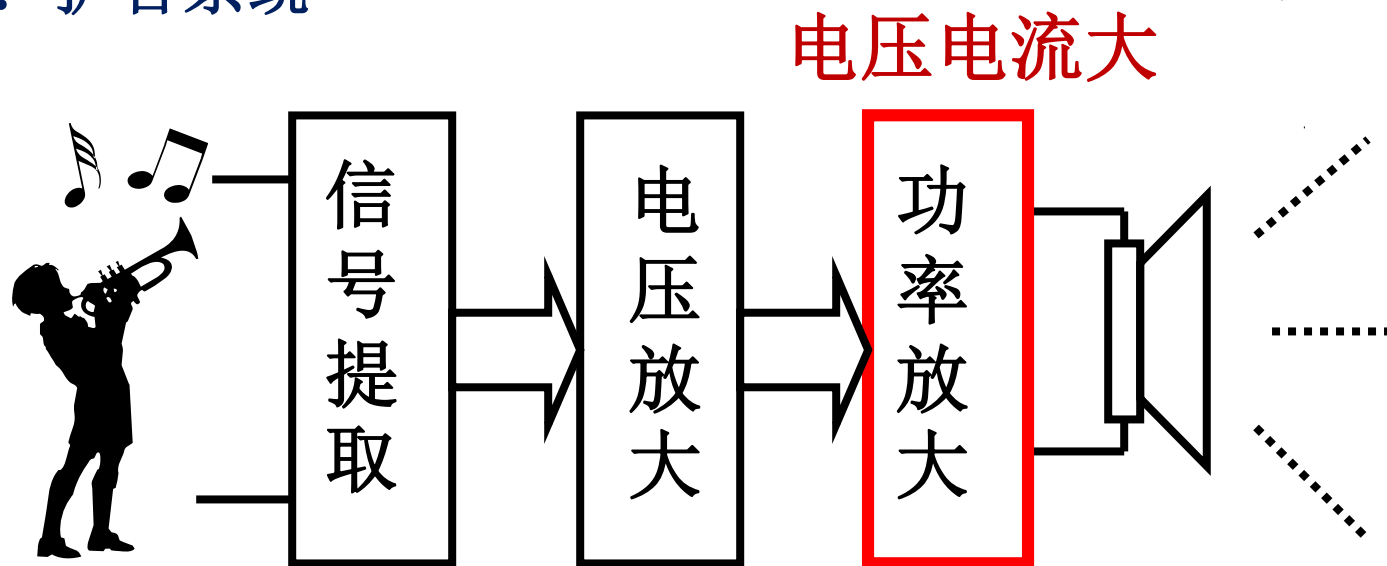




互补对称功率放大

功率放大器：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

例：扩音系统

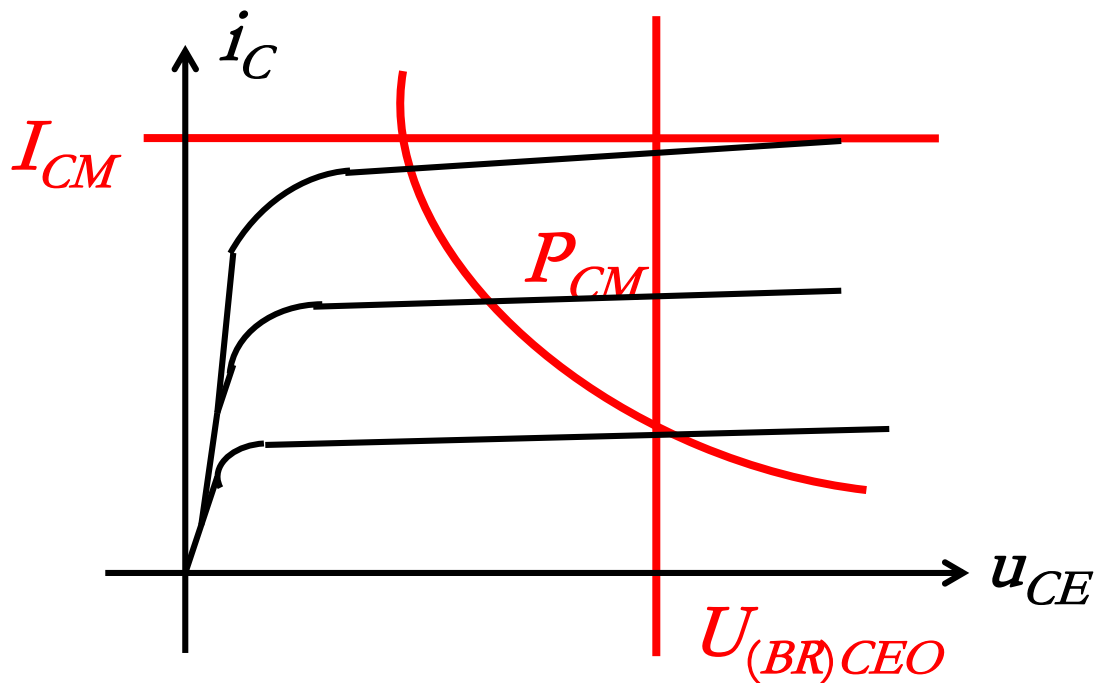




对功率放大电路的要求

- 在不失真的情况下能输出尽可能大的功率

功放电路电流、电压都比较大，必须防止波形失真，同时注意电路参数不能超过晶体管的极限值





对功率放大电路的要求

- 由于功率较大，必须提高效率！

$$\eta = \frac{P_o}{P_E} \times 100\%$$

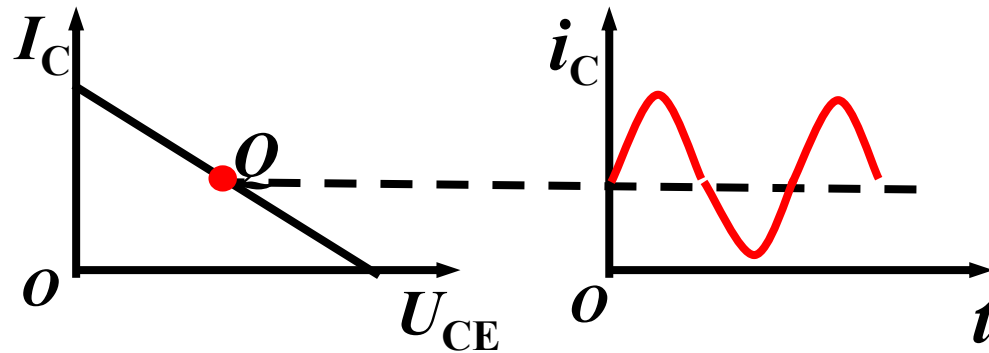
P_o : 负载上得到的交流信号功率

P_E : 电源提供的功率

单管共射放大电路存在较大的静态损耗，效率低

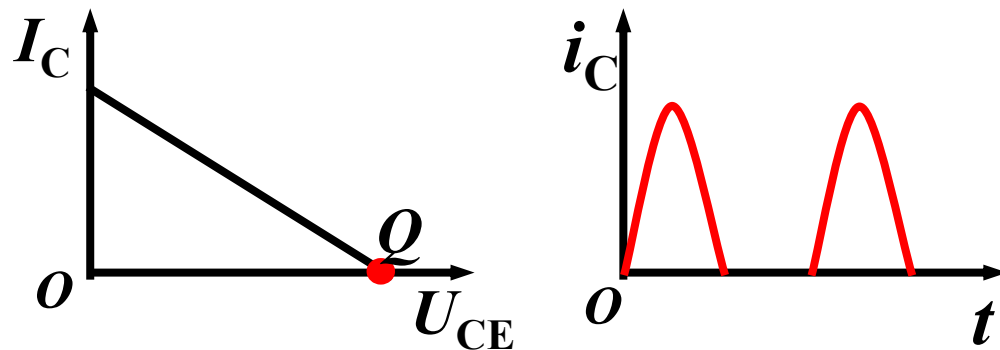


晶体管的工作状态和效率的关系



甲类工作状态

晶体管在输入信号的整个周期都导通
静态 I_C 较大, 管耗大
效率低, 波形好



乙类工作状态

晶体管只在输入信号的半个周期内导通
静态 $I_C = 0$, 管耗小, 效率高
波形严重失真

*如何实现效率高, 波形又好的电路?

采用两个晶体管, 构成互补对称射极输出器
(推挽输出电路)



互补对称功率放大电路

互补对称：电路中采用两支特性一致晶体管
NPN、 PNP各一支

互补对称功放的类型

无输出变压器形式
(OTL电路)

无输出电容形式
(OCL电路)



OCL互补对称功放电路

静态时 $u_i = 0V$

T_1 、 T_2 均不工作, $u_o = 0V$

动态时 $u_i > 0V$

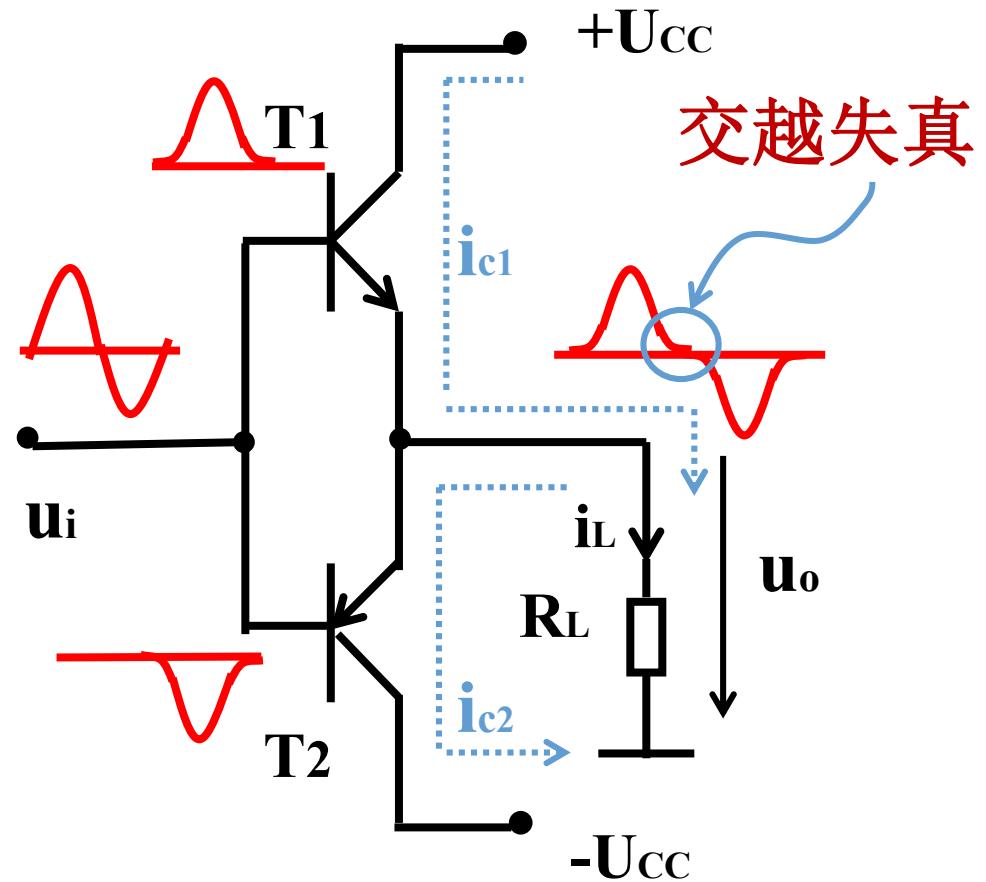
T_1 导通 T_2 截止

u_o 通过 T_1 跟随 u_i $i_L = i_{c1}$

$u_i < 0V$

T_1 截止 T_2 导通

u_o 通过 T_2 跟随 u_i $i_L = i_{c2}$



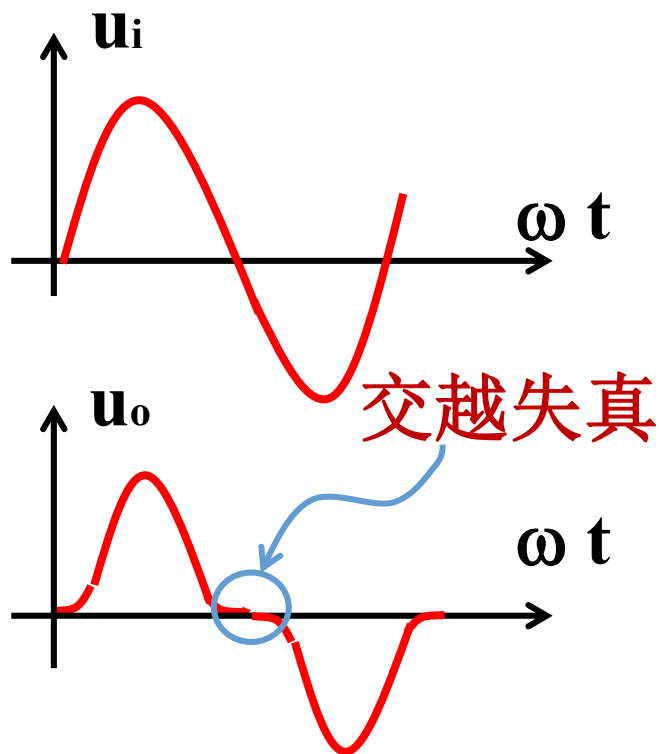
仿真

* T_1 、 T_2 两个晶体管都只在半个周期内工作, 为乙类工作状态

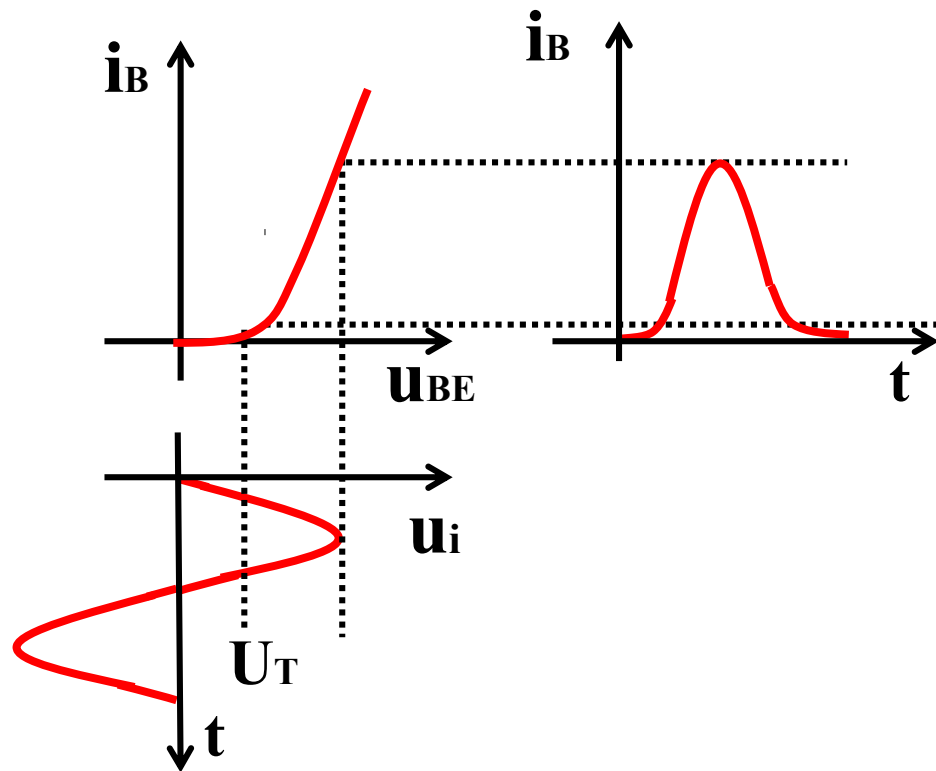


乙类放大的特点

- 静态电流 I_{CQ} 、 I_{BQ} 等于零
- 每管导通时间为半个周期
- 存在失真



出现交越失真的原因？



晶体管特性存在非线性
在 $u_i < U_T$ 以前晶体管在截止区



克服交越失真的措施

电路中增加 R_1 , D_1 , D_2 , R_2 支路

静态时:

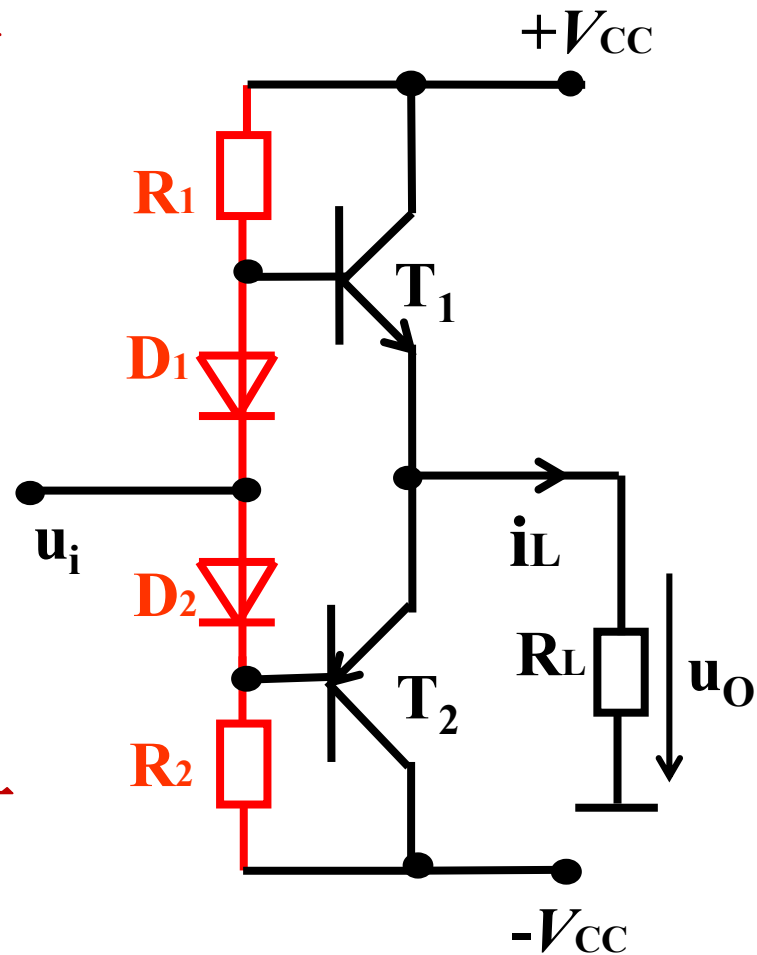
两管均处于微弱导通状态

动态时:

正半周 T_2 截止, T_1 进入良好的导通状态

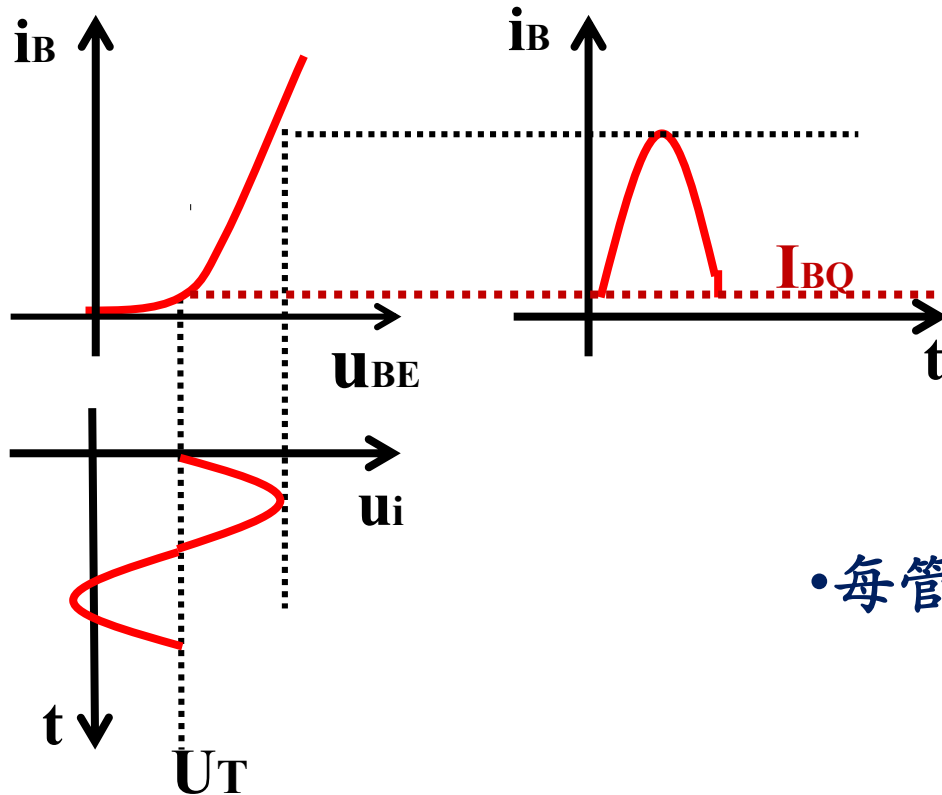
负半周 T_1 截止, T_2 进入良好的导通状态

两管导通时间均比半个周期大一些的工作方式称为甲乙类放大



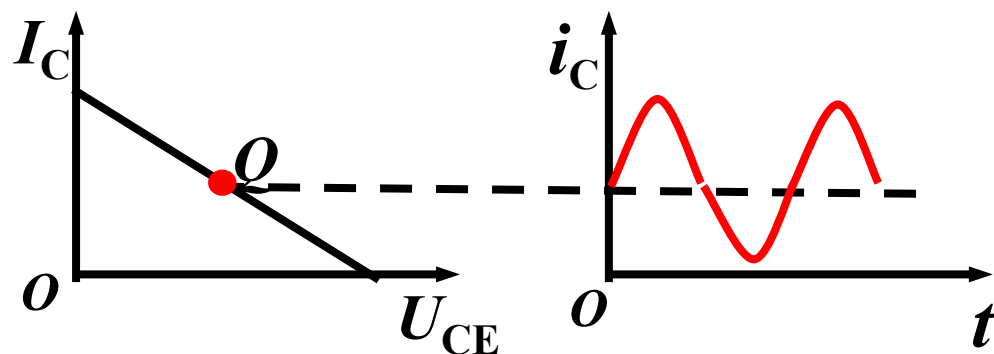


甲乙类放大的波形和特点



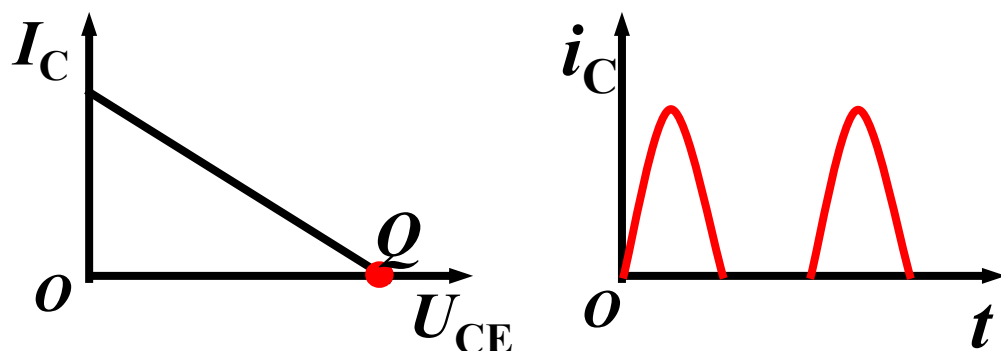
仿真

- 存在较小的静态电流
- 每管导通时间大于半个周期
- 基本不失真



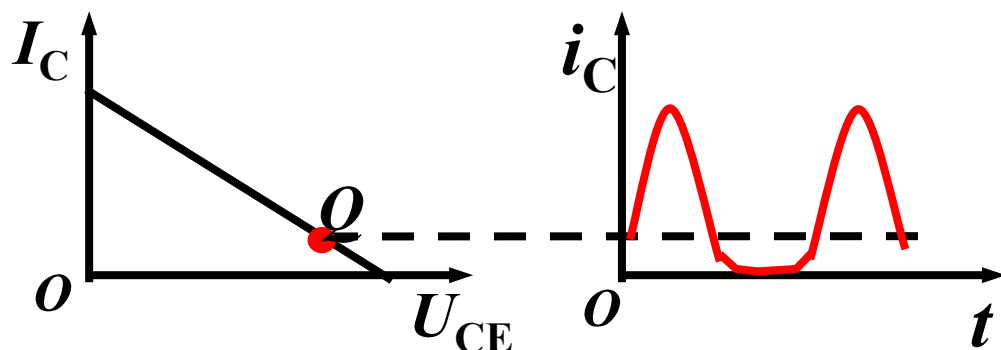
甲类工作状态

晶体管在输入信号的整个周期都导通
静态 I_C 较大, 管耗大, 效率低
波形基本不失真



乙类工作状态

晶体管只在输入信号的半个周期内导通
静态 $I_C = 0$, 管耗小, 效率高
波形严重失真



甲乙类工作状态

晶体管导通时间大于半个周期
静态 $I_C \approx 0$, 管耗小, 效率高
波形基本不失真



集成功率放大器

集成功放LM386接线图

