



清华大学

## 绪 论

- 一、电子技术的发展
- 二、模拟信号与模拟电路
- 三、电子信息系统的组成
- 四、模拟电子技术基础课的特点
- 五、如何学习这门课程

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 一、电子技术的发展

“无孔不入”，应用广泛；从电子管→半导体管→集成电路，半导体器件发展迅速。

1904年 电子管问世

1947年 晶体管诞生

1958年集成电路研制成功

电子管、晶体管、集成电路比较

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 半导体元器件的发展

- 1947年 贝尔实验室制成第一只晶体管
- 1958年 集成电路
- 1969年 大规模集成电路
- 1975年 超大规模集成电路

第一片集成电路只有4个晶体管，而1997年一片集成电路中有40亿个晶体管。20世纪末有科学家预测，集成度还将按10倍/6年的速度增长，到2015或2020年达到饱和。

学习电子技术方面的课程需时刻关注电子技术的发展！

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 值得纪念的几位科学家！

#### 第一只晶体管的发明者

(by John Bardeen, William Shockley and Walter Brattain in Bell Lab)

他们在1947年11月底发明了晶体管，并在12月16日正式宣布“晶体管”诞生。1956年获诺贝尔物理学奖。巴因所做的超导研究于1972年第二次获得诺贝尔物理学奖。

#### 第一个集成电路及其发明者

(Jack Kilby from TI)

1958年9月12日，在德州仪器公司的实验室里，实现了把电子器件集成在一块半导体材料上的构想。42年后，2000年获诺贝尔物理学奖。“为现代信息技术奠定了基础”。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

## 二、模拟信号与模拟电路

### 1. 电子电路中信号的分类

➢ 数字信号：离散性。

“1”的电压当量

“1”的倍数

介于 $K$ 与 $K+1$ 之间时需根据阈值确定为 $K$ 或 $K+1$

任何瞬间的任何值均是有意义的

➢ 模拟信号：连续性。大多数物理量为模拟信号。

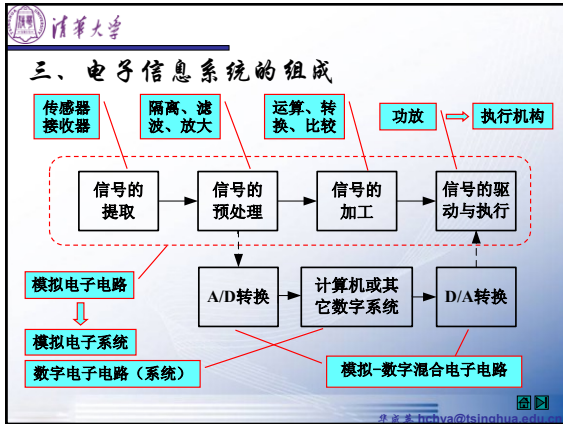
### 2. 模拟电路

➢ 模拟电路是对模拟信号进行处理的电路。

➢ 最基本的处理是对信号的放大，有功能和性能各异的放大电路。

➢ 其它模拟电路多以放大电路为基础。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn



清华大学

### 四、模拟电子技术基础课的特点

#### 1. 工程性

- 实际工程需要证明其可行性。**强调定性分析。**
- 实际工程在满足基本性能指标的前提下总是容许存在一定的误差范围的。**定量分析为“估算”。**
- 近似分析要“合理”。**抓主要矛盾和矛盾的主要方面。**
- 电子电路归根结底是电路。**不同条件下构造不同模型。**

#### 2. 实践性

- 常用电子仪器的使用方法
- 电子电路的测试方法
- 故障的判断与排除方法
- EDA软件的应用方法

电子元器件的特点使然

清华大学

### 五、如何学习这门课程

- 掌握基本概念、基本电路和基本分析方法
  - 基本概念**: 概念是不变的, 应用是灵活的, “万变不离其宗”。
  - 基本电路**: 构成的原则是不变的, 具体电路是多种多样的。正确识别电路是分析电路的基础。
  - 基本分析方法**: 不同类型的电路有不同的性能指标和描述方法, 因而有不同的分析方法。
- 注意定性分析和近似分析的重要性。
- 学会辩证、全面地分析电子电路中的问题, 学会发现问题。
- 上好“理论—EDA—实践”三个台阶。
- 注意电路中常用定理在电子电路中的应用。

清华大学

## 第一章 半导体二极管和三极管

### § 1.1 半导体基础知识

### § 1.2 半导体二极管

### § 1.3 晶体三极管

清华大学

## §1 半导体基础知识

### 一、本征半导体

### 二、杂质半导体

### 三、PN结的形成及其单向导电性

### 四、PN结的电容效应

清华大学

### 一、本征半导体

#### 1. 什么是半导体? 什么是本征半导体?

导电性介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。

导体——铁、铝、铜等金属元素等低价元素, 其最外层电子在外电场作用下很容易产生定向移动, 形成电流。

绝缘体——惰性气体、橡胶等, 其原子的最外层电子受原子核的束缚力很强, 只有在外电场强到一定程度时才能导电。

半导体——硅(Si)、锗(Ge), 均为四价元素, 它们原子的最外层电子受原子核的束缚力介于导体与绝缘体之间。

本征半导体是纯净的晶体结构的半导体。

无杂质 稳定的结构

清华大学

## 2. 本征半导体的结构

**共价键**

由于热运动, 具有足够能量的价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子, 其带负电。

自由电子的产生使共价键中留有一个空位置, 称为空穴, 其带正电。

自由电子与空穴相碰同时消失, 称为复合。动态平衡

一定温度下, 自由电子与空穴对的浓度一定; 温度升高, 热运动加剧, 挣脱共价键的电子增多, 自由电子与空穴对的浓度加大。

为什么要将半导体变成导电性很差的本征半导体?

清华大学

## 3. 本征半导体中的两种载流子

运载电荷的粒子称为载流子。

外加电场时, 带负电的自由电子和带正电的空穴均参与导电, 且运动方向相反。由于载流子数目很少, 故导电性很差。

温度升高, 热运动加剧, 载流子浓度增大, 导电性增强。热力学温度0K时不导电。

**两种载流子**

为什么要将半导体变成导电性很差的本征半导体?

清华大学

## 二、杂质半导体

### 1. N型半导体

**多数载流子**

空穴比未加杂质时的数目多了? 少了? 为什么?

杂质半导体主要靠多数载流子导电。掺入杂质越多, 多子浓度越高, 导电性越强, 实现导电性可控。

**磷 (P)**

清华大学

## 2. P型半导体

**多数载流子**

P型半导体主要靠空穴导电, 掺入杂质越多, 空穴浓度越高, 导电性越强。

在杂质半导体中, 温度变化时, 载流子的数目变化吗? 少子与多子变化的数目相同吗? 少子与多子浓度的变化相同吗?

**硼 (B)**

清华大学

## 三、PN结的形成及其单向导电性

物质因浓度差而产生的运动称为扩散运动。气体、液体、固体均有之。

**扩散运动**

扩散运动使靠近接触面P区的空穴浓度降低、靠近接触面N区的自由电子浓度降低, 产生内电场。

清华大学

## PN结的形成


由于扩散运动使P区与N区的交界面缺少多数载流子, 形成内电场, 从而阻止扩散运动的进行。内电场使空穴从N区向P区、自由电子从P区向N区运动。

**漂移运动**

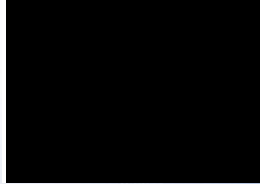
因电场作用所产生的运动称为漂移运动。

参与扩散运动和漂移运动的载流子数目相同, 达到动态平衡, 就形成了PN结。

### PN 结的单向导电性



**PN结加正向电压导通：**  
耗尽层变窄，扩散运动加剧，由于外电源的作用，形成扩散电流，PN结处于导通状态。



**必要吗？加电压截止：**  
耗尽层变宽，阻止扩散运动，有利于漂移运动，形成漂移电流。由于电流很小，故可近似认为其截止。

清华大学 华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

### 四、PN 结的电容效应

- 势垒电容**  
PN结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电相同，其等效电容称为势垒电容  $C_b$ 。
- 扩散电容**  
PN结外加的正向电压变化时，在扩散路程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放的过程，其等效电容称为扩散电容  $C_d$ 。

结电容： $C_j = C_b + C_d$

**结电容不是常量！若PN结外加电压频率高到一定程度，则失去单向导电性！**

清华大学 华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

### 讨论

- 为什么将自然界导电性能中等的半导体材料制成本征半导体，导电性能极差，又将其掺杂，改善导电性能？
- 为什么半导体器件的温度稳定性差？是多子还是少子是影响温度稳定性的主要因素？
- 为什么半导体器件有最高工作频率？

清华大学 华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

### §2 半导体二极管

- 一、二极管的组成
- 二、二极管的伏安特性及电流方程
- 三、二极管的等效电路
- 四、二极管的主要参数
- 五、稳压二极管

清华大学 华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

### 一、二极管的组成

将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。



小功率二极管

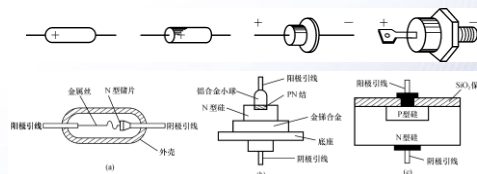
大功率二极管

稳压二极管

发光二极管

清华大学 华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

### 一、二极管的组成



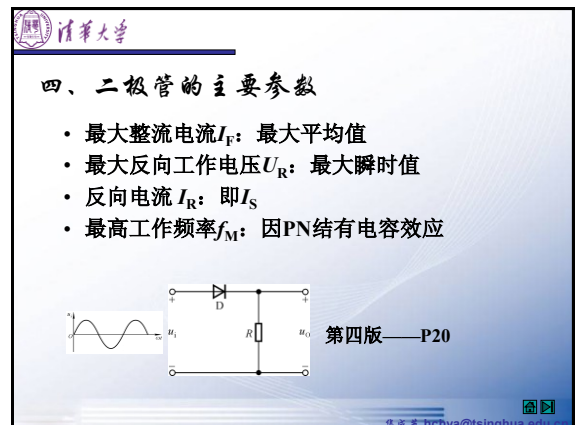
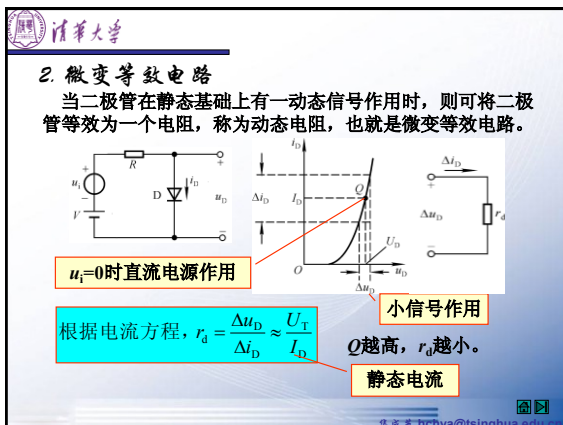
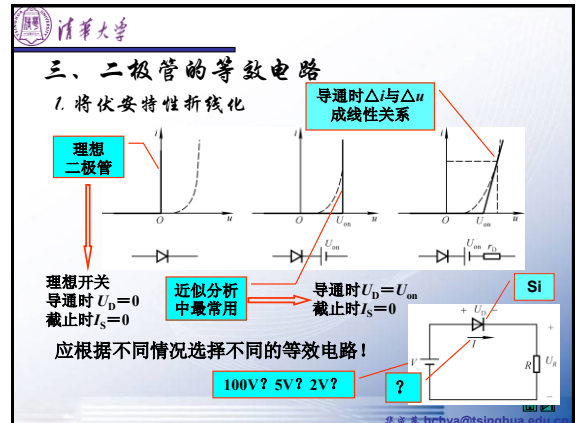
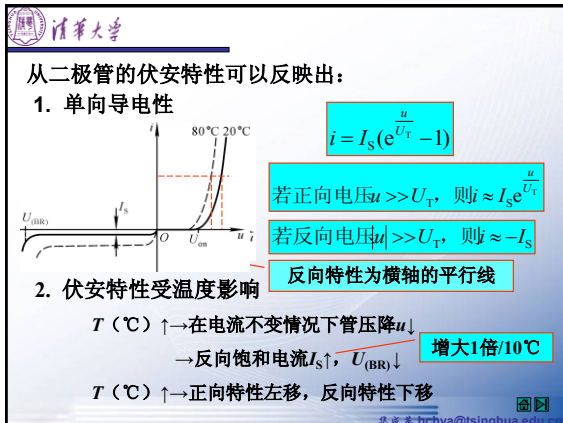
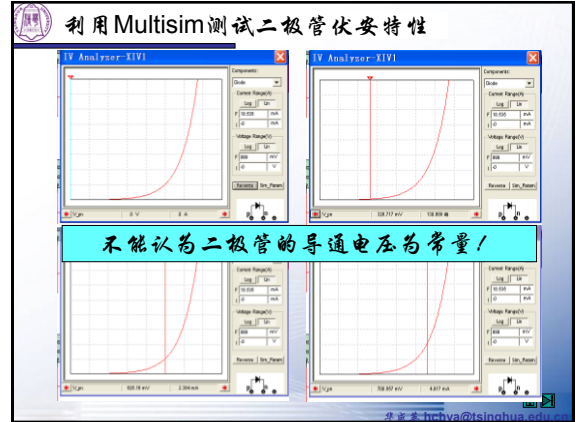
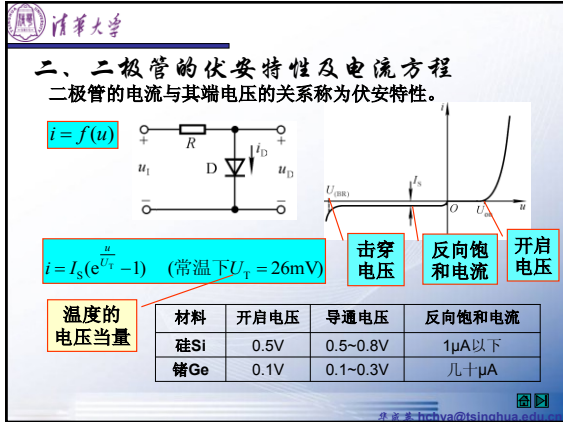
**点接触型：**结面积小，结电容小，故结允许的电流小，最高工作频率高。

**面接触型：**结面积大，结电容大，故结允许的电流大，最高工作频率低。

**平面型：**结面积可小、可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大。

清华大学 华成英 hchya@tsinghua.edu.cn





清华大学

讨论：解决两个问题

- 如何判断二极管的工作状态？
- 什么情况下应选用二极管的什么等效电路？

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

## §1.3 晶体三极管

- 一、晶体管的结构和符号
- 二、晶体管的放大原理
- 三、晶体管的共射输入特性和输出特性
- 四、温度对晶体管特性的影响
- 五、主要参数

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 一、晶体管的结构和符号

为什么有孔？

小功率管 中功率管 大功率管

多子浓度高 多子浓度很低，且很薄 面积大

晶体管有三个极、三个区、两个PN结。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 二、晶体管的放大原理

放大的条件  $\begin{cases} u_{BE} > U_{on} \text{ (发射结正偏)} \\ u_{CB} \geq 0, \text{ 即 } u_{CE} \geq u_{BE} \text{ (集电结反偏)} \end{cases}$

少数载流子的运动

因集电区面积大，在外电场作用下大部分扩散到基区的电子漂移到集电区

因基区薄且多子浓度低，使极少数扩散到基区的电子与空穴复合

因发射区多子浓度高使大量电子从发射区扩散到基区

基区空穴的扩散

扩散运动形成发射极电流  $I_E$ ，复合运动形成基极电流  $I_B$ ，漂移运动形成集电极电流  $I_C$ 。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### • 电流分配：

$I_E = I_B + I_C$

$I_E$ —扩散运动形成的电流  
 $I_B$ —复合运动形成的电流  
 $I_C$ —漂移运动形成的电流

直流电流放大系数  $\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

交流电流放大系数  $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$

穿透电流 集电结反向电流

为什么基极开路集电极回路会有穿透电流？

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 三、晶体管的共射输入特性和输出特性

#### 1. 输入特性 $i_B = f(u_{BE})|_{U_{CE}}$

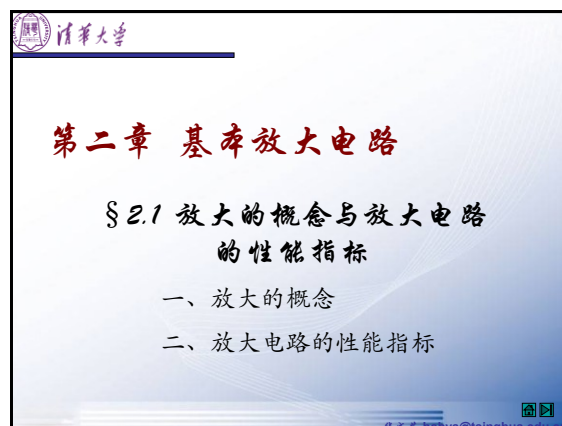
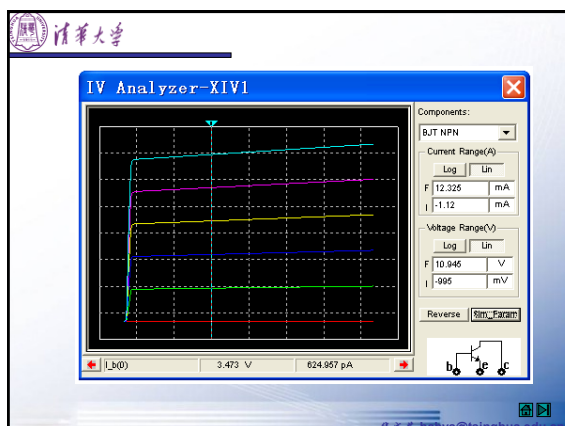
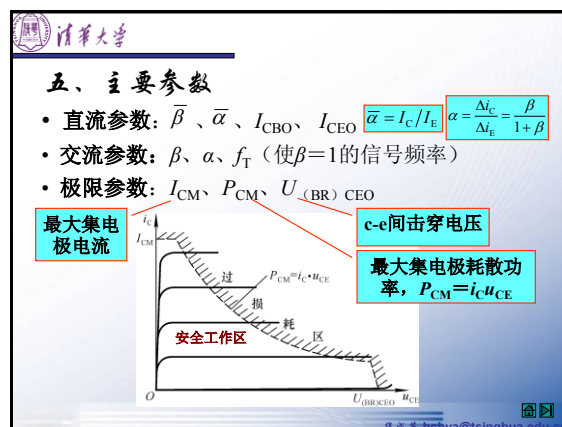
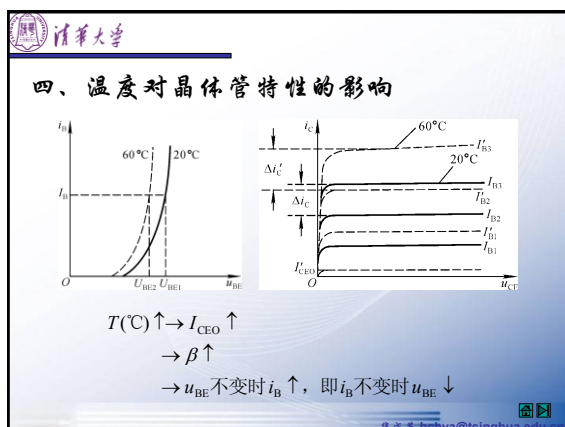
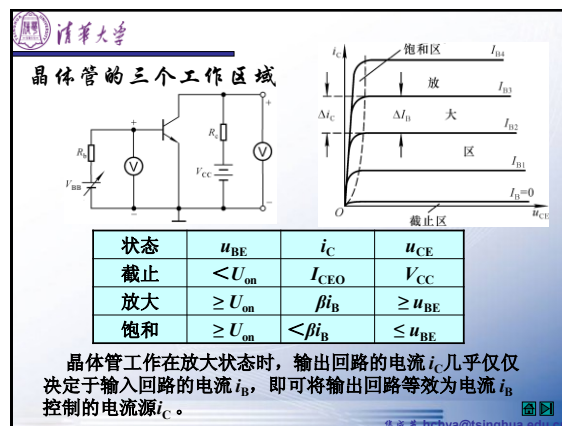
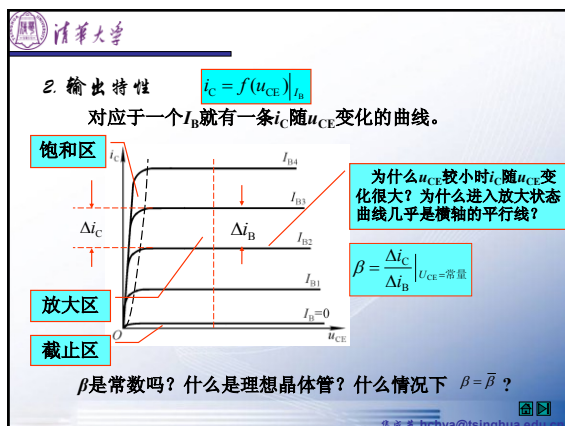
为什么像PN结的伏安特性？

为什么  $U_{CE}$  增大曲线右移？

为什么  $U_{CE}$  增大到一定值曲线右移就不明显了？

对于小功率晶体管， $U_{CE}$  大于1V的一条输入特性曲线可以取代  $U_{CE}$  大于1V的所有输入特性曲线。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn



清华大学

## 一、放大的概念

至少一路直流电源供电

◆放大的对象：变化量  
◆放大的本质：能量的控制和转换  
◆放大的特征：功率放大  
◆放大的基本要求：不失真——放大的前提

判断电路能否放大的基本出发点

清华大学

## 二、性能指标

常以正弦波作为测试信号！

对信号而言，任何放大电路均有输入和输出两个端口。

1. 放大倍数：输出量与输入量之比

$$\dot{A}_{ui} = \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad \dot{A}_i = \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad \dot{A}_{ur} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \quad \dot{A}_{ir} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$$

电压放大倍数是最常被研究和测试的参数

清华大学

## 2. 输入电阻和输出电阻

从输入端看进去的等效电阻

将输出等效成有内阻的电压源，内阻就是输出电阻。

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

输入电压与输入电流有效值之比。

$$R_o = \frac{U_o' - U_o}{\frac{U_o}{R_L}} = \left( \frac{U_o'}{U_o} - 1 \right) R_L$$

空载时输出电压有效值

带 $R_L$ 时的输出电压有效值

清华大学

## 3. 通频带

衡量放大电路对不同频率信号的适应能力。

由于电容、电感及放大管PN结的电容效应，使放大电路在信号频率较低和较高时电压放大倍数数值下降，并产生相移。

下限频率

上限频率

中频段 (通频带)

4. 最大不失真输出电压 $U_{om}$ ：交流有效值。  
5. 最大输出功率 $P_{om}$ 和效率 $\eta$ ：功率放大电路的参数

清华大学

## §2.2 基本共射放大电路的工作原理

一、电路的组成及各元件的作用  
二、设置静态工作点的必要性  
三、波形分析  
四、放大电路的组成原则

清华大学

## 一、电路的组成及各元件的作用

$V_{BB}$ 、 $R_b$ ：使 $U_{BE} > U_{on}$ ，且有合适的 $I_B$ 。  
 $V_{CC}$ ：使 $U_{CE} \geq U_{BE}$ ，同时作为负载的能量。  
 $R_c$ ：将 $\Delta I_C$ 转换成 $\Delta U_{CE}(u_o)$ 。

共射

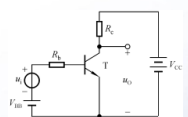
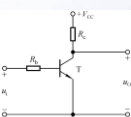
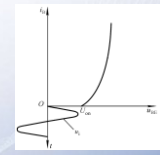
动态信号作用时： $\Delta u_i \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{R_c} \rightarrow \Delta u_{CE}(u_o)$

输入电压 $u_i$ 为零时，晶体管各极的电流、b-e间的电压、管压降称为静态工作点 $Q$ ，记作 $I_{BQ}$ 、 $I_{CQ}$  ( $I_{EQ}$ )、 $U_{BEQ}$ 、 $U_{CEQ}$ 。



**二、设置静态工作点的必要性**

为什么放大的对象是动态信号，却要晶体管在信号为零时有合适的直流电流和极间电压？

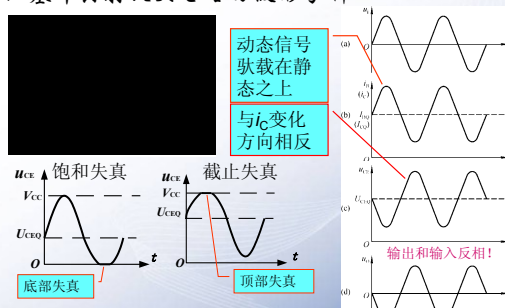




输出电压必然失真！

设置合适的静态工作点，首先要解决失真问题，但Q点几乎影响着所有的动态参数！

**三、基本共射放大电路的波形分析**

动态信号驮载在静态之上  
与 $i_C$ 变化方向相反



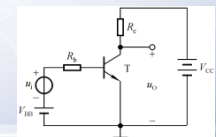
饱和失真  
底部失真

截止失真  
顶部失真

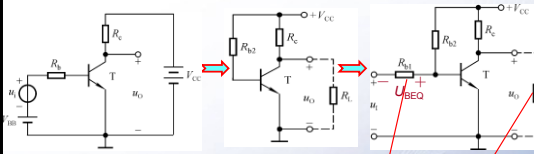
输出和输入反相！

**四、放大电路的组成原则**

- 静态工作点合适：合适的直流电源、合适的电路参数。
- 动态信号能够作用于晶体管的输入回路，在负载上能够获得放大的动态信号。
- 对实用放大电路的要求：共地、直流电源种类尽可能少、负载上无直流分量。



**两种实用放大电路：（1）直接耦合放大电路**



问题：

- 两种电源
- 信号源与放大电路不“共地”

将两个电源合二为一

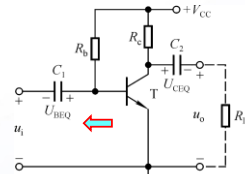
有交流损失

有直流分量

静态时， $U_{BEQ} = U_{Rb1}$

动态时， $V_{CC}$ 和 $u_i$ 同时作用于晶体管的输入回路。动态信号驮载在静态之上。

**两种实用放大电路：（2）阻容耦合放大电路**



$C_1$ 、 $C_2$ 为耦合电容！

耦合电容的容量应足够大，即对于交流信号近似为短路。其作用是“隔离直流、通过交流”。

静态时， $C_1$ 、 $C_2$ 上电压？  
 $U_{C1} = U_{BEQ}$ ， $U_{C2} = U_{CEQ}$

动态时， $u_{BE} = u_i + U_{BEQ}$ ，信号驮载在静态之上。  
负载上只有交流信号。

**§2.3 放大电路的分析方法**

- 放大电路的直流通路和交流通路
- 图解法
- 等效电路法



## 一、放大电路的直流通路和交流通路

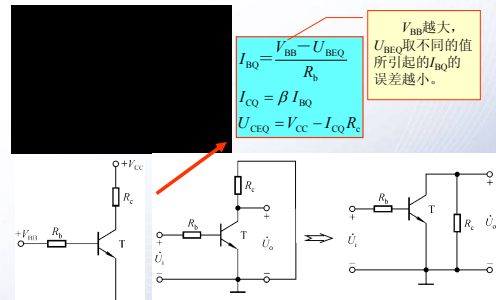
通常，放大电路中直流电源的作用和交流信号的作用共存，这使得电路的分析复杂化。为简化分析，将它们分开作用，引入直流通路和交流通路的概念。

1. 直流通路：①  $U_s=0$ ，保留  $R_s$ ；② 电容开路；③ 电感相当于短路（线圈电阻近似为0）。
2. 交流通路：① 大容量电容相当于短路；② 直流电源相当于短路（内阻为0）。

清华大学 hcbvya@tsinghua.edu.cn



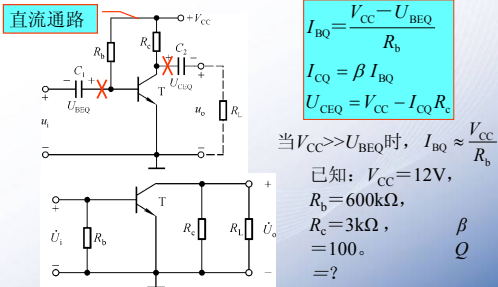
## 基本共射放大电路的直流通路和交流通路



列晶体管输入、输出回路方程，将  $U_{BEQ}$  作为已知条件，令  $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ ，可估算出静态工作点。



## 阻容耦合单管共射放大电路的直流通路和交流通路

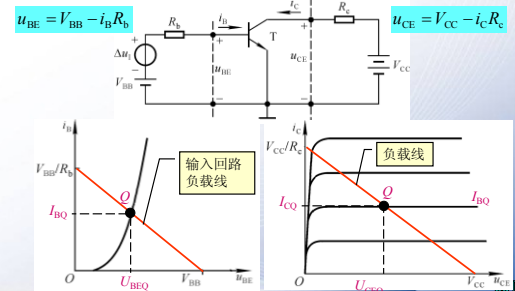


清华大学 hcbvya@tsinghua.edu.cn

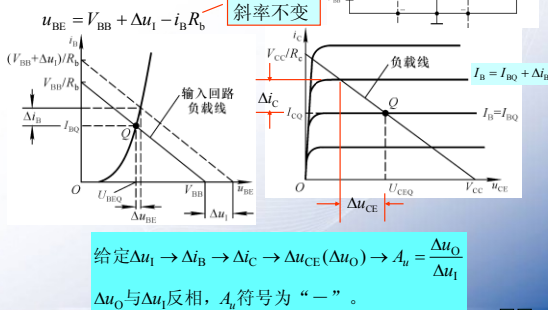


## 二、图解法 应实测特性曲线

1. 静态分析：图解二元方程



## 2. 电压放大倍数的分析

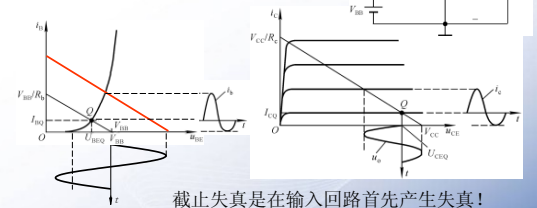


清华大学 hcbvya@tsinghua.edu.cn



## 3. 失真分析

- 截止失真



截止失真是在输入回路首先产生失真！

消除方法？

减小  $R_b$  能消除截止失真吗？

清华大学 hcbvya@tsinghua.edu.cn

清华大学

• 饱和失真：饱和和失真是输出回路产生失真。

消除方法？

清华大学

失真分析与最大不失真输出电压

决定  $U_{om}$

决定  $U_{om}$

• 最大不失真输出电压  $U_{om}$ ：比较  $U_{CEQ}$  与  $(V_{CC} - U_{CEQ})$ ，取其小者，除以  $\sqrt{2}$

清华大学

讨论一：

• 利用Multisim分析图示电路在V2小于何值时晶体管截止、大于何值时晶体管饱和。

以V2作为输入、以节点1作为输出，采用直流扫描的方法可得！

线性区

约小于0.5V时截止

约大于1V时饱和

描述输出电压与输出电压之间函数关系的曲线，称为电压传输特性。

清华大学

直流负载线和交流负载线

直流负载线  $(-1/R_c)$

交流负载线  $[-1/(R_c // R_L)]$

$U_{om} = ?$  Q点在什么位置  $U_{om}$  最大？

交流负载线应过Q点，且斜率决定于  $(R_c // R_L)$

清华大学

三、等效电路法

• 半导体器件的非线性特性使放大电路的分析复杂化。利用线性元件建立模型，来描述一定条件下非线性器件的特性。

1. 直流模型：适于Q点的分析

输入回路等效为恒压源

输出回路等效为电流控制的电流源

理想二极管

利用估算法求解静态工作点，实质上利用了直流模型。

清华大学

2. 晶体管的h参数等效模型（交流等效模型）

低频小信号模型

• 在交流通路中可将晶体管看成一个二端口网络，输入回路、输出回路各为一个端口。

$$\begin{cases} u_{BE} = f(i_B, u_{CE}) \\ i_C = f(i_B, u_{CE}) \end{cases}$$

清华大学

在低频、小信号作用下的关系式

$$\begin{cases} du_{BE} = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \Big|_{u_{CE}} di_B + \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \Big|_{i_B} du_{CE} \\ di_C = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \Big|_{u_{CE}} di_B + \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \Big|_{i_B} du_{CE} \end{cases}$$

电阻 无量纲 无量纲 电导

$$\begin{cases} \dot{U}_{be} = h_{11} \dot{I}_b + h_{12} \dot{U}_{ce} \\ \dot{I}_c = h_{21} \dot{I}_b + h_{22} \dot{U}_{ce} \end{cases}$$

交流等效模型（按式子画模型）

清华大学

$h$ 参数的物理意义

分清主次，合理近似！什么情况下 $h_{12}$ 和 $h_{22}$ 的作用可忽略不计？

清华大学

简化的 $h$ 参数等效电路—交流等效模型

基区体电阻  
发射结电阻  
发射区体电阻  
数值小可忽略

利用PN结的电流方程可求得

$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = r_{bb'} + r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

查阅手册 由 $I_{EQ}$ 算出

在输入特性曲线上， $Q$ 点越高， $r_{be}$ 越小！

清华大学

3. 放大电路的动态分析

放大电路的交流等效电路

$$\dot{U}_i = \dot{I}_i (R_b + r_{be}) = \dot{I}_b (R_b + r_{be})$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R_c$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b + r_{be}$$

清华大学

阻容耦合共射放大电路的动态分析

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c (R_c \parallel R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta R_L}{r_{be}}$$

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \dot{A}_u = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{A}_u$$

$$R_i = R_b \parallel r_{be} \approx r_{be} \quad R_o = R_c$$

清华大学

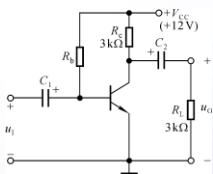
讨论二：阻容耦合共射放大电路的静态分析和动态分析

$\beta = 80, r_{be} = 1k\Omega$



**清华大学**

### 讨论三：



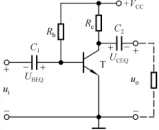
已知  $I_{CQ} = 2\text{mA}$ ,  $U_{CES} = 0.7\text{V}$ 。

1. 在空载情况下，当输入信号增大时，电路首先出现饱和失真还是截止失真？若带负载的情况下呢？
2. 空载和带载两种情况下  $U_{om}$  分别为多少？
3. 在图示电路中，有无可能在空载时输出电压失真，而带上负载后这种失真消除？
4. 增强电压放大能力的方法？

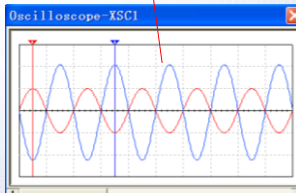
张高亮 hchya@tsinghua.edu.cn

**清华大学**

### 讨论四：波形分析



失真了吗？如何判断？原因？



Oscilloscope-XSC1

Time	Channel A	Channel B
T1	0.000 mV	0.000 mV
T2	1.747 mV	1.747 mV
T3	1.800 mV	1.800 mV

张高亮 hchya@tsinghua.edu.cn

**清华大学**

## 模拟电子技术基础

**自动化系：赵勇**  
**办公电话：62795961**  
**办公地点：中央主楼702室**  
**电子邮件：zhaoy18@tsinghua.edu.cn**




张高亮 hchya@tsinghua.edu.cn

### 1 学习方法


- 听课是关键；
- 概念性强、思路很重要；
- 复习紧跟课件、适当作些练习题。

### 2 纪律要求

- 上课不迟到；
- 课上不吃东西，课堂保持安静；
- 作业不抄袭；
- 作业迟交或抄袭不给成绩。



### 3 考查方式



- 作业10%，平时出勤5%，期中考试35%（开卷），期末考试50%（半开卷）。
- 期末考试时可以带一张统一下发的草稿纸，可将重要的或难记的公式等写在上边以备查询；因此平时无需背记复杂的公式等。

**清华大学**

### 知识回顾：

- 1、二极管及其单向导电性。
- 2、三极管及其电流方法原理。
- 3、三极管的输入输出特性。
- 4、基本共射放大电路。
- 5、放大电路的分析方法。

### 问题：

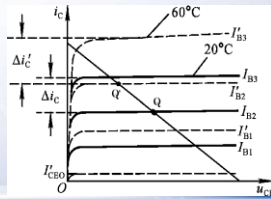
- 1、什么是三极管的静态工作点？
- 2、温度的变化会对三极管的特性带来什么样的影响？

张高亮 hchya@tsinghua.edu.cn

## §2.4 静态工作点的稳定

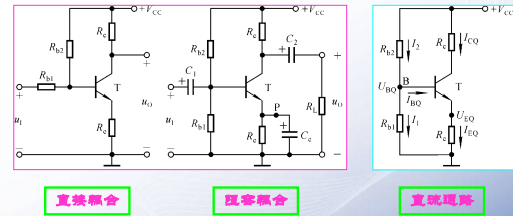
静态工作点不仅决定了电路是否会失真，而且还影响着电压放大倍数、输入电阻等动态参数。而实际上，电阻漂移、元器件老化、温度变化等都会造成Q点不稳定，而其中，温度对晶体管参数的影响是最为重要的。

因此就，所谓稳定Q点，就是指在环境温度变化时，保证静态基极电流和管压降保持不变。所以必须设法稳定静态电流的变化来抵消Q点在输出特性曲线中的位置变化。



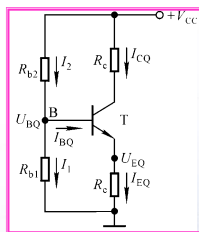
## 典型的静态工作点稳定电路

### 1、电路组成



$C_e$  为旁路电容，在交流通路中可视为短路。

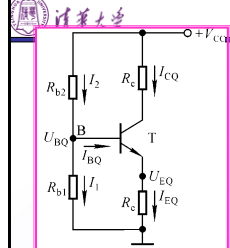
## 2、稳定原理



为了稳定Q点，通常应保证  
 $I_1 > I_{BQ}$ ，即  $I_1 \approx I_2$

因此  $U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$   
表明基极电位仅取决于  $R_{b1}$  与  $R_{b2}$   
对  $V_{CC}$  的分压，与温度无关。

$T(^\circ\text{C}) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow (U_B \text{ 基本不变}) \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$



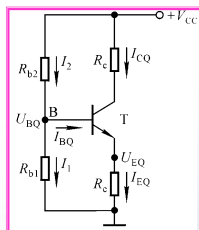
Q点稳定原因：

- 1、 $R_e$  的直流负反馈作用；
- 2、在  $I_1 \gg I_{BQ}$  的情况下， $U_{BQ}$  在温度变化时基本不变。

不难看出，在稳定过程中， $R_e$  起着重要作用，当晶体管输出回路静态基极电流变化时，通过发射极电阻  $R_e$  上产生变化的电压来影响 B-E 间电压，从而使基极电流向相反方向变化，达到稳定Q点的目的。

这种将输出量通过一定的方式引回到输入回路来影响输入量的措施称为反馈；由于反馈的结果使输出量的变化减小，故称为负反馈；又由于反馈出现在直流通路中，故称直流负反馈。

## 3、Q点分析与估算



发射极电流

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

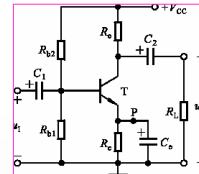
由于  $I_{CQ} \approx I_{EQ}$ ，管压降

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

基极电流

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

## 4、动态参数估算



放大倍数：

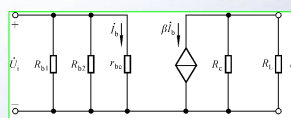
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_L}{r_{be}}$$

输入电阻：

$$R_i = R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel r_{be}$$

输出电阻：

$$R_o = R_c$$



清华大学

输入电阻:

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_c]$$

输出电阻:

$$R_o = R_c$$

放大倍数:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_c R_c} = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_c}$$

利?弊?

若  $(1 + \beta)R_c \gg r_{be}$ , 则  $A_u \approx -\frac{R_c}{R_c}$

清华大学

### 5、稳定静态工作点的方法

- 引入直流负反馈( $R_b$ )
- 温度补偿:  $R_{b1}$ 或 $R_{b2}$ 采用热敏电阻。 $R_{b1}$ 应具有负温度系数,  $R_{b2}$ 应具有正温度系数。

清华大学

### §2.5 单管放大电路的三种基本接法

1、共射放大电路

基本共射电路通过基极电流对集电极电流的控制作用, 实现了能量转换, 使负载电阻从直流电源中获得了比信号源提供的大得多的输出信号功率, 既实现了电流放大又实现了电压放大。

共射电路的电路形式是以发射极为公共端, 基极输入、集电极输出, 通过基极电流对集电极电流的控制作用实现功率放大。

对于基本共射放大电路:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}} \quad I_c = \beta I_b$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b + r_{be} \quad R_o = R_c$$

清华大学

### 共集放大电路——射极输出器, 射极跟随器

基极输入、射极输出

要使晶体管工作在放大区, 电路设置仍须要满足发射结正偏, 集电结反偏的状态。

Q点分析:

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

$$V_{CC} = U_{CEQ} + I_{EQ}R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e$$

清华大学

### 共集放大电路——射极输出器, 射极跟随器

输出电阻:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{I_e R_e}{I_b (R_b + r_{be}) + I_e R_e} = \frac{(1 + \beta)R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

若  $(1 + \beta)R_e \gg R_b + r_{be}$ , 则  $\dot{A}_u \approx 1$ , 即  $U_o \approx U_i$ 。

射极跟随器:

无放大电流, 不放大电压

输入电阻:

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{I_b} = \frac{I_b (R_b + r_{be}) + I_e R_e}{I_b} = R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e$$

清华大学

输出电阻:

令输入信号为零, 在输出端加 $U_o$ , 则

$$R_o = \frac{U_o}{I_o}$$

$$I_o = I_c + I_e \quad I_c = (1 + \beta)I_b$$

$$I_b = \frac{U_o}{R_b + r_{be}}$$

共集放大电路特点:

- 电压放大倍数小于1, 略等于1;
- 输入电阻大;
- 输出电阻小;

### §2.5 单管放大电路的三种基本接法

1. 共射 2. 共基 3. 共集

#### 1、共射放大电路

基本共射电路通过基极电流对集电极电流的控制作用，实现了能量转换，使负载电阻从直流电源中获得了比信号源提供的大得多的输出信号功率，既实现了电流放大又实现了电压放大。

共射电路的电路形式是以发射极为公共端，基极输入、集电极输出，通过基极电流对集电极电流的控制作用实现功率放大。

对于基本共射放大电路：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$I_c = \beta I_b$$

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_b + r_{be}$$

$$R_o = R_c$$

### 共集放大电路——射极输出器，射极跟随器

#### 基极输入、射极输出

要使晶体管工作在放大区，电路设置仍须满足发射结正偏，集电结反偏的状态。

**Q点分析：**

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

$$V_{CC} = U_{CEQ} + I_{EQ}R_e$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e$$

### 共集放大电路——射极输出器，射极跟随器

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{I_e R_e}{I_b(R_b + r_{be}) + I_e R_e} = \frac{(1 + \beta)R_e}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

若  $(1 + \beta)R_e \gg R_b + r_{be}$ ，  
则  $\dot{A}_u \approx 1$ ，即  $U_o \approx U_i$ 。

**射极跟随器：**  
只放大电流，不放大电压

**输入电阻：**

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{I_b(R_b + r_{be}) + I_e R_e}{I_b} = R_b + r_{be} + (1 + \beta)R_e$$

### 共集放大电路特点：

- 1、电压放大倍数小于1，略等于1；
- 2、输入电阻大；
- 3、输出电阻小；

**输出电阻：**  
令输入信号为零，在输出端加  $U_o$ ，则

$$R_o = \frac{U_o}{I_o}$$

$$I_o = I_{Re} + I_e \quad I_e = (1 + \beta)I_b$$

$$I_b = \frac{U_o}{R_b + r_{be}}$$

$$R_o = R_e // \frac{R_b + r_{be}}{1 + \beta}$$

### 共基放大电路

**Q点分析：**

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_c}, \quad I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta}$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ}$$

### 射极跟随器分析：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{I_e R_c}{I_e R_c + I_b r_{be}} = \frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta)R_c}$$

一般  $R_c$  数值比  $R_c$  小，  
所以放大倍数大于1。

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{I_e R_c + I_b r_{be}}{I_e} = R_c + \frac{r_{be}}{(1 + \beta)}$$

$$R_o = R_c$$

**共基放大电路特点：**  
只放大电压，不放大电流，频带宽！



清华大学

### 4、三种基本接法的比较：空载情况下

接法	共射	共集	共基
$A_u$	大	小于1	大
$R_i$	中	大	小
$R_o$	大	小	大
极性转换	反相	同向	同向
放大作用	电流、电压	电流	电压
其它			频带宽

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### § 1.7 场效应管

场效应管的概念：是利用输入回路的电场效应来控制输出回路电流的一种半导体器件（电压控制电流）。

场效应管的分类：结型和绝缘栅型两种。

结型场效应管

- N沟道
- P沟道

绝缘栅型场效应管

- N沟道
  - 耗尽型
  - 增强型
- P沟道
  - 耗尽型
  - 增强型

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 结型场效应管

#### 1. N沟道结型场效应管结构

在同一块N型半导体上制作两个高掺杂的P区，并将它们连接在一起，引出一个电极称为栅极 $g$ 。

N型半导体的两端分别引出两个电极，一个称为源极 $s$ ，一个称为漏极 $d$ 。

N沟道管

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 2. N沟道结型场效应管工作原理 ( $U_{GS} < 0, U_{DS} \geq 0$ )

要使其正常工作， $U_{GS} < 0, U_{DS} \geq 0$

$U_{GS} < 0$ ，既保证了耗尽区范围内很高的特点，又实现了 $U_{GS}$ 对沟道的控制作用。

???

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### PN结反向偏置

内电场增强，抑制扩散、加剧漂移，形成反向电流，也就是漂移电流，而漂移电流是由少数载流子引起的，而其数量很少，因此漂移电流很小，常可忽略不计，认为PN结处于截止状态。

反向饱和电流很小， $\mu A$ 级

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### (1) 当漏源电压 $U_{DS}$ （短路）时， $U_{GS}$ 对导电沟道的控制作用。

(a) 耗尽层很窄，导电沟道很宽

(b) 耗尽层变宽，沟道变窄，沟道电阻增大

(c) 导电沟道消失，夹断状态

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

(2) 当  $U_{GS}$  为某一固定值时,  $U_{DS}$  对漏极电流  $i_D$  的影响——输出特性

当漏源之间电压在0至夹断电压之间的某一个确定值时, 若漏源之间电压为零, 则虽然存在导电沟道, 但由于没有漏源电压, 因此, N区的电子不会产生定向移动, 形成漏极电流。

漏源之间加电压后, 沟道各点相对栅极电压不再相等

$U_{DG} = U_{DS} - U_{GS}$

PN结反向偏置

漏源间电压的增加一方面使得导电沟道变窄, 电流有变小的趋势; 另一方面, 漏源电压的增大使得漏源间纵向电场增大, 从而使得漏源电流有变大的趋势。在漏源间没出现夹断区之前, 电流增大的趋势服从于减小趋势。

当夹断后, 沟道电阻明显增加, 使得电流明显减小, 其减小趋势与漏源电压增加引起的电流增加趋势相抵消, 电流不再随漏源电压增加而变化。

漏源电压为常值时, 漏极电流与漏源电压成正比。

清华大学

场效应管与晶体管的比较

- ※ 场效应管的栅极g、漏极s、源极d对应晶体管的基极b、发射极e、集电极c;
- ※ 场效应管用栅-源电压  $U_{GS}$  控制漏极电流  $i_D$ , 栅极基本不取电流, 具有高输入电阻;
- ※ 场效应管只有多子参与导电, 晶体管内既有多子又有少子参与导电, 而少子数目受温度影响较大, 因此场效应管温度稳定性好;
- ※ 场效应管的栅极和源极可以互换使用, 互换后特性变化不大, 而晶体管的发射极和集电极互换后性能差异很大。

清华大学

5、如何解决电流或者电压放大倍数不够大的问题

- ★ 复合管: 提高电流放大倍数
- ★ 多级放大电路: 提高电压放大倍数

多级放大电路的另一个用途是为了满足各种不同的电路设计要求。

如果将共射和共基电路组合在一起, 有什么好处?

如果将共集共基电路组合在一起, 有什么好处?

清华大学

复合管

- 两只同类型 (NPN或PNP) 的晶体管组成复合管: 等效成同类型的管子;
- 两只不同类型的晶体管组成复合管: 等效管类型与第一只管子相同。

清华大学

复合管的组成原则:

$\beta \approx \beta_1 \beta_2$

$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2) = i_{B1}(1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \approx \beta_1 \beta_2 i_{B1}$$

清华大学

### 5、如何解决电流或者电压放大倍数不够大的问题

- **复合管：**  
提高电流放大倍数
- **多级放大电路：**  
提高电压放大倍数

多级放大电路的另一个用途是为了满足各种不同的电路设计要求。

史新亮 hchya@tsinghua.edu.cn

清华大学

### § 2.7 复合管

- 两只同类型（NPN和NPN，或PNP和PNP）的晶体管组成复合管：**等效成同类型的管子；**
- 两只不同类型的晶体管组成复合管：**等效管类型与第一只管子相同。**

史新亮 hchya@tsinghua.edu.cn

清华大学

**复合管的组成原则：**

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

$$i_E = i_{B1}(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)$$

$$= i_{B1}(1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2)$$

$$\approx \beta_1 \beta_2 i_{B1}$$

史新亮 hchya@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 第三章 多级放大电路

#### 一、直接耦合 (前级输出直接与后级输入相连)

对于直流量，相当于电压源；  
对交流量，等效一个小电阻。

问题：T1管接近饱和区 → 加 $R_{E1}$  → 加二极管或稳压管

史新亮 hchya@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 直接耦合方式的特点

- ※ 容
- ※ 具
- ※ 电

史新亮 hchya@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 阻容耦合电路及特点 (前级输出经电容耦合到后级输入端)

#### 阻容耦合方式的特点

- ※ 各级之间直流通路不相通，Q点各自独立；
- ※ 低频特性差，不能放大缓慢变化的信号；
- ※ 电路中有大电容，不易集成化。

史新亮 hchya@tsinghua.edu.cn

### 3.1 变压器耦合电路及特点

- 通过变压器将前级输出接到后级输入或负载上；
- 前后级靠磁路耦合，Q点相互独立；
- 不能放大缓慢信号，低频特性差；
- 非常笨重，不易集成化。

### 3.2 多级放大电路的动态分析

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_{o2}}{\dot{U}_{i2}} \cdots \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{in}} = \prod_{j=1}^n \dot{A}_{uj}$$

$$R_i = R_{i1} \quad R_o = R_{on}$$

对电压放大电路的要求： $R_i$ 大， $R_o$ 小， $A_u$ 数值大，最大不失真输出电压大。

### 3.3 多级放大电路分析举例

**静态：**阻容耦合，各静态工作点相互独立

$$I_{BQ2} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ2}}{R_3 + (1 + \beta_2)R_6}$$

$$I_{EQ2} = (1 + \beta_2)I_{BQ2}$$

$$U_{CEQ2} \approx V_{CC} - I_{EQ2}R_6$$

### 3.3 多级放大电路分析举例

第一级为共射、第二级为共集

**动态：**

为求第一级的放大倍数，首先要求出负载电阻，即第二级的输入电阻

$$R_{i2} = R_3 // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_6 // R_L)]$$

第一级为共射电路

$$\dot{A}_{u1} = -\frac{\beta R'_{L1}}{r_{be1}} = -\frac{\beta (R_2 // R_{i2})}{r_{be1}}$$

第二级为共集电路

$$\dot{A}_{u2} = \frac{(1 + \beta_2)(R_6 // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_6 // R_L)}$$

电路的输入电阻

$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be1}$$

电路的输出电阻

$$R_o = R_{e2} = R_6 // \frac{R_3 // R_2 + r_{be2}}{1 + \beta_2}$$

### 3.4 直接耦合放大电路

工程实际中，人们发现，在直接耦合放大电路中，即使将输入端短路，输出也会有缓慢变化的输出电压——**零点漂移现象**。

产生的原因包括电源电压波动、元件老化、半导体器件特性随温度变化而产生的变化等

**解决措施：**

- 电源电压波动——选用高质量的稳压电源；
- 元件老化——使用经过老化实验处理的元件；
- 温度影响（温漂）——电路中引入直流负反馈（Q点稳定电路）或用热敏元件进行温度补偿，或者使用“差分放大电路”。

### 3.5 电路的构成取现

◆ 左边是典型的Q点稳定电路；

◆ 右边受温度控制的直流电压源，当温度影响使得集电极静态电位变化时，V始终与之保持相等的变化，这样，输出电压之中就只有动态信号的作用结果。

◆ 此时，电路的输出没有接地点。

既然左边电路也受温度影响，右边直流电压源V也受温度影响，如果用与左边典型的Q点稳定电路参数完全相同，管子特性也完全相同的电路取代右边的直流电压源V，如下图所示。可以想象，两只管子的集电极静态电位在温度变化时也将相等，电路以两只管子的集电极电位差作为输出，就可以克服温漂了。

**结构特点：**对称性， $R_{B1} = R_{B2} = R_B$ ， $R_{E1} = R_{E2} = R_E$ ， $T_1$ 和 $T_2$ 特性完全相同。



**清华大学**

大小相等极性相同

共模抑制作用

大小相等极性相反

实现放大作用

Re的存在使得电路放大能力变差

电源与信号源没有共地

长尾式差分放大电路

若输入为差模信号，Re相当于短路

大大提高了电路对差模信号的放大能力

静态分析：

$$I_{R_e} = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ}$$

$$I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c + U_{BEQ} + I_{BQ}R_b$$

电压增益：

$$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$$

**清华大学**

二、对差模信号的抑制作用

电路输入共模信号时，由于电路参数和管子特性完全对称：

$\Delta i_{B1} = \Delta i_{B2}, \Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$

$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$

$u_O = u_{C1} - u_{C2}$

$= (u_{CQ1} + \Delta u_{C1}) - (u_{CQ2} + \Delta u_{C2})$

$= 0$

共模放大倍数  $A_c = \frac{\Delta u_{OC}}{\Delta u_{IC}}$

参数理想对称时  $A_c = 0$

**清华大学**

三、对差模信号的放大作用

电路输入大小相等极性相反的差模信号时，由于电路参数和管子特性完全对称：

$\Delta i_{B1} = -\Delta i_{B2}$

$\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$

$\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$

$\Delta u_O = 2\Delta u_{C1}$

**清华大学**

$u_{id}$ 经分压后，加在T<sub>1</sub>管一边的为 $+\frac{u_{id}}{2}$ ，加在T<sub>2</sub>管一边的为 $-\frac{u_{id}}{2}$ 。

E点电位在差模信号作用下，相当于“地”；又由于负载电阻中点也接地，因而 $R_c$ 被分成相等的两部分，分别接在交流通路中T<sub>1</sub>管和T<sub>2</sub>管的c-e之间。

差模放大倍数  $A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$

$\Delta u_{Id} = 2\Delta i_{B1} \cdot (R_b + r_{be})$

$\Delta u_{Od} = -2\Delta i_{C1} \cdot (R_c // \frac{R_l}{2})$

**清华大学**

四、动态参数  $A_d$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 、 $A_c$ 、 $K_{CMR}$

$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$

在参数理想对称的情况下， $K_{CMR} = \infty$ 。

**清华大学**

四、差分放大电路的四种接法

1. 双端输入双端输出

$u_{id}$ 经分压后，加在T<sub>1</sub>管一边的为 $+\frac{u_{id}}{2}$ ，加在T<sub>2</sub>管一边的为 $-\frac{u_{id}}{2}$ 。

E点电位在差模信号作用下，相当于“地”；又由于负载电阻中点也接地，因而 $R_c$ 被分成相等的两部分，分别接在交流通路中T<sub>1</sub>管和T<sub>2</sub>管的c-e之间。

差模放大倍数  $A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$

$\Delta u_{Id} = 2\Delta i_{B1} \cdot (R_b + r_{be})$

$\Delta u_{Od} = -2\Delta i_{C1} \cdot (R_c // \frac{R_l}{2})$

清华大学

### 1、双端输入双端输出

两个输入端与两个输出端均没接地

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 2、双端输入单端输出

#### 差模输入情况下的动态分析

$$\Delta u_{O1} = -\Delta i_c \cdot (R_c // R_L)$$

$$\Delta u_{Id} = 2\Delta i_b \cdot (R_b + r_{be})$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 共模输入情况下的动态分析

$$A_c = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_c}$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_c}{2(R_b + r_{be})}$$

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 3、单端输入双端输出

差模输入信号  $u_{Id} = u_{I1}(\text{左边} + \frac{u_1}{2}, \text{右边} - \frac{u_1}{2})$

共模输入信号  $u_{Ic} = \frac{u_1}{2}(\text{左右都为} + \frac{u_1}{2})$

由于输入差模信号的同时伴随有共模输入信号，所以

$$u_O = A_d \cdot u_1 + A_c \cdot \frac{u_1}{2}$$

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 4、单端输入单端输出

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 四种接法动态参数的比较

	输入电阻	输出电阻	差模放大倍数	共模放大倍数
双入双出	$2(R_b + r_{be})$	$2R_c$	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	0
单入双出	$2(R_b + r_{be})$	$2R_c$	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	0
双入单出	$2(R_b + r_{be})$	$R_c$	$-\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_c}$
单入单出	$2(R_b + r_{be})$	$R_c$	$-\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	$-\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_c}$

在单端输入的条件下，若输入信号为  $u_1$ ，其差模输入电压  $u_{Id}$  为  $u_1$ ，而共模输入电压  $u_{Ic}$  为  $+\frac{u_1}{2}$ ，此时输出电压  $u_o = A_d u_1 + A_c \cdot \frac{u_1}{2}$

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

在单端输出差分放大电路中，

$$A_c = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_c}$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$K_{CMR} = \frac{A_d}{A_c} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1+\beta)R_c}{2(R_b + r_{be})}$$

可见， $R_c$  越大， $K_{CMR}$  越大，越能有效抑制温漂，差分放大电路的性能越好。可以设想，如果  $R_c$  为无穷大，则单端输出电路的共模抑制比将为无穷大。

但  $R_c$  太大，会有什么问题？？

### 3.3.1 改进型差分放大电路

由于T3管输出特性很平，认为由T3构成的恒流源的内阻非常大，即相当于在T1和T2管的发射极接了一个阻值接近无穷大的电阻，对共模信号的负反馈作用极强，可认为  $A_c = 0$ ，共模抑制比无穷大。

恒流源电路

$$I_2 \gg I_{B3}$$

$$I_{E3} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{EE} - U_{BEQ}$$

这个电流不随输入信号的变化，也不随温度的变化——恒流源

可见，恒流源电路既为差分放大电路设置了合适的静态工作点，又大大增强了共模负反馈作用，使电路具有更强的抑制共模信号的能力。

为了获得高输入电阻的差分放大电路，可以将晶体管换成场效应管。

实际电路中，难以做到电路参数的完全对称，常用一电位器加在两只管子的发射极之间。

$R_W$  为调零电位器，取值应很小。

### 3.3.2 直接耦合互补输出级

对于电压放大电路的输出级要求：一是输出电阻小（带负载能力强）；二是最大不失真输出电压尽可能大。

静态时，输入电压为零（输入接地），T1和T2截止，输出也为零。

如果输入信号为正弦波，当输入大于零时，T1导通、T2截止，T1以射极输出器的形式将正半周信号传递到负载，电流通路如图实线。

相反，当输入小于零，T1截止、T2导通，T2以射极输出器的形式将负半周信号传递到负载，电流通路如图虚线。

### 3.3.3 消除交越失真的互补输出级

静态：  $U_{B1} = U_{D1}, U_{B2} = -U_{D2}$

如果晶体管与二极管都选用同一种材料，就可以使T1和T2均处于微导通状态。

动态：  $u_{o1} \approx u_{o2} \approx u_i$

二极管的动态电阻很小

### 3.3.4 消除交越失真的准互补输出级

为了增大T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>管的电流放大系数，常采用复合管结构作为输出级。

若  $I_2 \gg I_{B1}$ ，则有

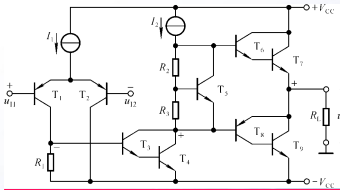
$$U_{BE2} = U_{CE} \approx \frac{R_2 + R_3}{R_4} \cdot U_{BE} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) U_{BE}$$

如果合理选择  $R_3$  和  $R_4$ ，可以得到  $U_{BE}$  任意倍数的直流电压，称为  $U_{BE}$  倍增电路。

这种电路的最大不失真电压多大？

### 3.3.2 直接耦合多级放大电路

实用的直接耦合多级放大电路，常用差分电路作为输入级，可减小整个电路的温漂，增大共模抑制比。如果输入信号是一个微弱的电压信号，则应考虑采用场效应管差分电路。而对于输出级，一般采用互补输出级，可使输出电阻较小，提高带负载能力，而且最大不失真电压幅值可接近电源电压。为了进一步增强放大能力，中间级常用共射放大电路。



读图方法：

按信号流通顺序将电路“化整为零”，将N级放大电路分为N个基本放大电路。

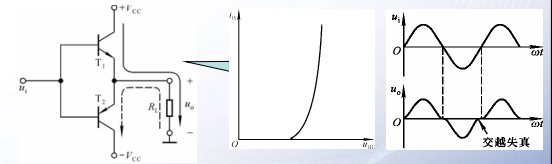
第一级：双端输入单端输出的差放

第二级：以复合管为载大管的共射放大电路

第三级：互补输出级

### 3.3.3 直接耦合互补输出级

对于电压放大电路的输出级要求：一是输出电阻小（带负载能力强）；二是最大不失真输出电压尽可能大。

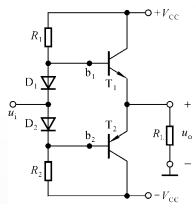


静态时，输入电压为零（输入接地），T1和T2截止，输出也为零。

如果输入信号为正弦波，当输入大于零时，T1导通、T2截止，T1以射极输出器的形式将正半周信号传递到负载，电流通路如图实线。

相反，当输入小于零，T1截止、T2导通，T2以射极输出器的形式将负半周信号传递到负载，电流通路如图虚线。

### 消除交越失真的互补输出级



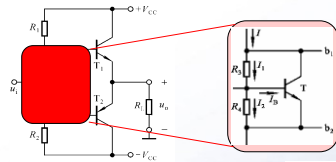
静态：  $U_{B1} = U_{D1}, U_{B2} = -U_{D2}$

如果晶体管与二极管都选用同一种材料，就可以使T1和T2均处于微导通状态。

动态：  $u_{b1} \approx u_{b2} \approx u_i$

二极管的动态电阻很小

### 消除交越失真的准互补输出级



为了增大T1、T2管的电流放大系数，常采用复合管结构作为输出级。

若  $I_2 \gg I_B$ ，则有

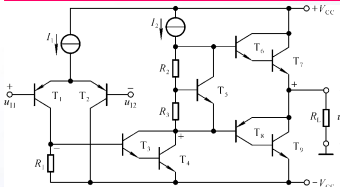
$$U_{BE2} = U_{CE1} \approx \frac{R_2 + R_4}{R_4} \cdot U_{BE1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_4}\right) \cdot U_{BE1}$$

如果合理选择  $R_2$  和  $R_4$ ，可以得到  $U_{BE}$  任意倍数的直流电压，称为  $U_{BE}$  倍增电路。

这种电路的最大不失真电压多大？

### 3.3.4 直接耦合多级放大电路

实用的直接耦合多级放大电路，常用差分电路作为输入级，可减小整个电路的温漂，增大共模抑制比。如果输入信号是一个微弱的电压信号，则应考虑采用场效应管差分电路。而对于输出级，一般采用互补输出级，可使输出电阻较小，提高带负载能力，而且最大不失真电压幅值可接近电源电压。为了进一步增强放大能力，中间级常用共射放大电路。



读图方法：

按信号流通顺序将电路“化整为零”，将N级放大电路分为N个基本放大电路。

第一级：双端输入单端输出的差放

第二级：以复合管为载大管的共射放大电路

第三级：互补输出级

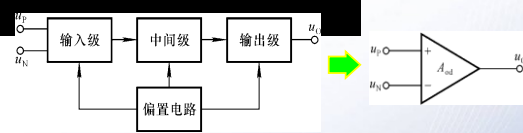
### 第四章 集成运算放大电路

#### 一、集成运放的特点

- 1、采用直接耦合方式，多用差分放大电路做输入级、电流源电路做偏置电路或有源负载。
- 2、电路复杂并不增加制作工序，所以常用复杂电路实现高性能的放大电路。
- 3、多用有源元件替代无源元件，如用晶体管或场效应管取代难于制作的大电阻。
- 4、常采用复合管。



## 二、集成运放的组成及各部分作用

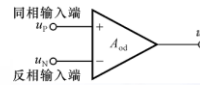


**偏置电路:** 为各级放大电路设置合适的静态工作点。与分立元件不同, 集成运放多采用电流源电路为各级提供合适的集电极或射极静态工作电流。

**输入级:** 要求  $R_i$  大,  $A_d$  大,  $A_c$  小。多采用差分放大电路。

**中间级:** 主放大级, 要求有足够的放大能力, 多采用共射或共源放大电路。常用复合管或以恒流源做集电极负载来提高电路的放大倍数。

**输出级:** 功率级, 要求  $R_o$  小, 最大不失真输出电压尽可能大。多采用互补输出级。

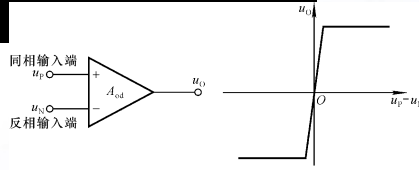


集成运放有两个输入端, 一个输出端。分别为同相输入端和反向输入端, 这里“同向”与“反向”是指与输出电压之间的相位关系。

因此, 从外部看, 可以认为集成运放是一个双端输入、单端输出、具有高差模放大倍数、高输入电阻、低输出电阻、能较好抑制温漂的差动放大电路。



## 三、集成运放的电压传输特性



集成运放的电压传输特性包括线性区和非线性区 (饱和区)

**在线性区内:**  $u_O = A_{od}(u_P - u_N)$ ,  $A_{od}$  是开环差模放大倍数。

**非线性区内:** 输出电压只有两种可能,  $+U_{OM}$  或  $-U_{OM}$ 。

由于  $A_{od}$  可达几十万倍, 所以集成运放的线性工作区很窄。当差模输入电压大于一定值时, 集成运放就会工作在非线性区。

## 四、集成运放中的电流源电路

用途?

### 1、镜像电流源

$T_0$  和  $T_1$  特性完全相同

$$U_{BE1} = U_{BE0}, I_{B1} = I_{B0}$$

$$I_{C1} = I_{C0}, I_{C1} \text{ 为输出电流}$$

电阻  $R$  中的电流为基准电流:

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = I_C + \frac{2I_C}{\beta}$$

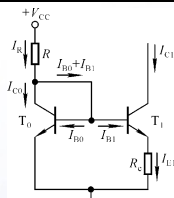
$$\text{若 } \beta \gg 2 \text{ 时, 则 } I_C \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}$$

若要较小的  $I_C$ , 则  $U_{BE}$  必较小,  $R$  的数值必然很大, 这在集成电路中是很难做到的。

镜像关系

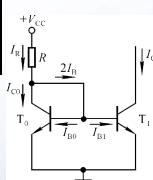
## 四、集成运放中的电流源电路

### 2、微电流源



$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{U_{BE0} - U_{BE1}}{R_e}$$

设计实际电路时, 首先确定  $I_R$  和  $I_{C1}$ , 然后选定  $R$  和  $R_e$ 。



$$I_C \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}$$

微电流源的输出电流比基准电流源的输出电流小得多。

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

集成运放是一个多级放大电路, 需要多路电流源分别给各级提供合适的静态电流。

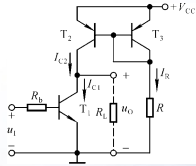
根据所需静态电流, 来选取发射极电阻的数值。

根据所需静态电流, 来确定集电极面积。

根据所需静态电流, 来选定沟道尺寸。

## 五、以电流源为有源负载的放大电路

### 1、用于共射放大电路

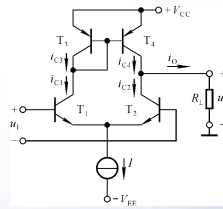


为提高共射电路的电压放大倍数，行之有效的办法是增大集电极电阻，但这一举措会同时带来一些弊端。用电流源取代集电极电阻（有源负载），因为电流源既有交流等效电阻很大的特点，同时在电源电压不变的条件下可获得合适的静态电流。

哪只管子为放大管？  
其集电极静态电流约为多少？



### 2、用于差分放大电路



电路的输入、输出方式？

$$\begin{aligned} \text{静态: } I_{C1} &= I_{C2} \quad I_{C3} \approx I_{C1} \\ I_{C4} &= I_{C3} \quad I_{C4} \approx I_{C2} \\ I_O &= I_{C4} - I_{C2} \approx 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{动态: } \Delta i_{C1} &= -\Delta i_{C2} \\ \Delta i_{C4} &= \Delta i_{C3} \approx \Delta i_{C1} \\ \Delta i_O &= \Delta i_{C4} - \Delta i_{C2} \approx 2\Delta i_{C1} \end{aligned}$$

使单端输出电路的差模放大倍数近似等于双端输出时的差模放大倍数。

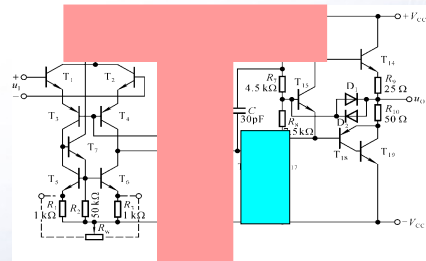
## § 4.3 集成运放读图

### 一、读图方法

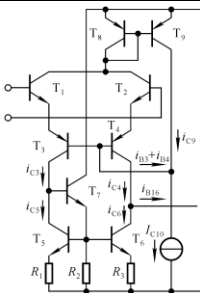
- 化整为零：将整个电路图分为各自具有一定功能的基本电路（偏置电路、输入级、中间级、输出级）。
- 分析功能：定性分析每一部分电路的基本功能和性能。
- 统观整体：电路相互连接关系以及连接后电路实现的功能和性能。
- 定量计算：必要时可估算或应用计算机计算电路的主要参数。

### 二、举例

对于集成运放电路，应首先找出偏置电路，然后根据信号流通顺序，将其分为输入级、中间级和输出级电路。



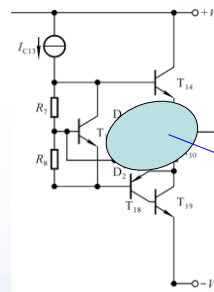
若在集成运放电路中能够估算出某一支路的电流，则这个电流往往是偏置电路中的基准电流。



$T_1$ 与 $T_2$ 、 $T_3$ 与 $T_4$ 两两对称，构成共集一共基电路，输入电阻大，频带宽。

$T_5$ 、 $T_6$ 与 $T_7$ 构成电流源电路，作为差分放大电路的有源负载，提高了输入级的放大能力和共模抑制比。

输入级是一个输入电阻大、频带宽、对温漂和共模信号抑制能力强、有较大差模电压放大倍数的双端输入、单端输出差分放大电路。



$T_{18}$ 与 $T_{19}$ 复合而成PNP管与 $T_{14}$ 构成互补形式。

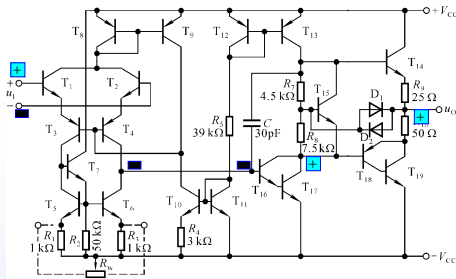
$R_7$ 与 $R_8$ 和 $T_{15}$ 构成 $U_{BE}$ 倍增电路，为输出级设置合适的静态工作点，消除交越失真。

过流保护电路： $R_9$ 和 $R_{10}$ 为输出电流采样电阻，与 $D_1$ 和 $D_2$ 一起构成过流保护。输出未过流时，两只二极管均截止。

$$U_{D1} + U_{R7} = U_{BE14} + I_O R_9$$

$I_O$ 增大到一定程度， $D_1$ 导通，为 $T_{14}$ 基极分流，从而保护 $T_{14}$ 。

## 判断同相输入端和反相输入端

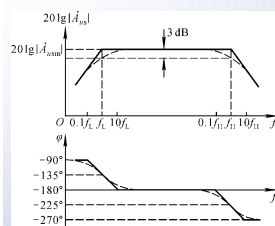


## § 4.4 集成运放的主要性能指标

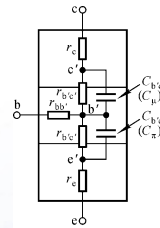
指标参数	F007典型值	理想值
■ 开环差模增益 $A_{od}$	106dB	$\infty$
■ 差模输入电阻 $r_{id}$	2M $\Omega$	$\infty$
■ 共模抑制比 $K_{CMR}$	90dB	$\infty$
■ 输入失调电压 $U_{IO}$	1mV	0
■ $U_{IO}$ 的温漂 $dU_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几 $\mu V/^{\circ}C$	0
■ 输入失调电流 $I_{IO}$ ( $ I_{B1} - I_{B2} $ )	20nA	0
■ $I_{IO}$ 的温漂 $dI_{IO}/dT(^{\circ}C)$	几nA/ $^{\circ}C$	0
■ 最大共模输入电压 $U_{ICmax}$	$\pm 13V$	
■ 最大差模输入电压 $U_{Idmax}$	$\pm 30V$	
■ -3dB带宽 $f_H$	10Hz	$\infty$
■ 转换速率 $S_R (=du_o/dt)_{max}$	0.5V/ $\mu S$	$\infty$

## 第五章 放大电路的频率响应

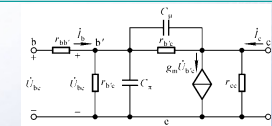
- 研究的问题：放大电路对信号频率的适应程度，即信号频率对放大倍数的影响。
- 主要参数： $f_L$ 、 $f_H$ 、 $f_{bw}$
- 在低频段使放大倍数数值下降的原因：随着信号频率逐渐降低，耦合电容、旁路电容等的容抗增大，使动态信号损失。
- 在高频段使放大倍数数值下降的原因：随着信号频率逐渐升高，晶体管极间电容和分布电容、寄生电容等杂散电容的容抗减小，使动态信号损失。



## § 5.1 晶体管的高频等效电路

一、混合 $\pi$ 模型 从结构建立的模型

$r_c$ 和 $r_e$ 为集电区和发射区体电阻，阻值很小，可忽略；

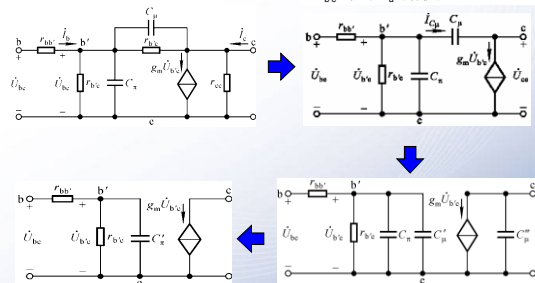


$g_m$ 为跨导，它不随信号频率的变化而变。

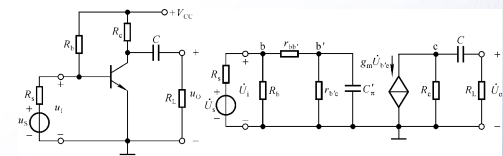
$$I_c = g_m \dot{U}_{be}$$

体电阻  
结电阻  
结电容

- $r_{ce}$ 远大于CE间所接负载电阻；
- $r_{be}$ 远大于 $C_{\pi}$ 的容抗；



## § 5.2 单管共射放大电路的频率响应



中频段： $C$ 短路， $C_{\pi}$ 开路。

低频段：考虑 $C$ 的影响， $C_{\pi}$ 开路。

高频段：考虑 $C_{\pi}$ 的影响， $C$ 短路。

### 二、中频电压放大倍数

$$\dot{A}_{usm} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_{be}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{be}}$$

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{be}}{r_{be}} \cdot [-g_m (R_c // R_L)]$$

空载时,  $\dot{A}_{usmo} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{be}}{r_{be}} \cdot (-g_m R_c)$

### 二、低频电压放大倍数

$$\dot{A}_{usl} = \dot{A}_{usmo} \cdot \frac{R_L}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_L}$$

$$= \dot{A}_{usmo} \cdot \frac{R_L}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_L} \cdot \frac{R_c + R_L}{R_c + R_L} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + \frac{1}{j\omega(R_c + R_L)C}} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + \frac{f_L}{j f}}$$

$$\omega = 2\pi f \quad f_L = \frac{1}{2\pi(R_L + R_c)C} \quad \text{称为下限频率}$$

### 低频电压放大倍数的分析

$$\dot{A}_{usl} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + \frac{f_L}{j f}} \quad (f_L = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C})$$

采用对数坐标系, 横轴为  $\lg f$ , 可开阔视野; 纵轴为  $20\lg|\dot{A}|$ , 单位为“分贝”(dB), 使得“ $\times$ ”→“+”。

**20dB/10倍频**

$f = f_L$  时,  $20\lg|\dot{A}_{usl}|$  下降3dB,  $\varphi = -135^\circ$ ;  
 $f \ll f_L$  时,  $20\lg|\dot{A}_{usl}| \approx 20\lg|\dot{A}_{usm}| - 20\lg \frac{f_L}{f}$ ,  
 即频率每下降10倍, 增益下降20dB;  
 $f \rightarrow 0$  时,  $|\dot{A}_{usl}| \rightarrow 0$ ,  $\varphi \rightarrow -90^\circ$ 。

### 三、高频电压放大倍数

$$\dot{A}_{ush} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + j \frac{f}{f_H}} \quad f_H = \frac{1}{2\pi RC_c} = \frac{1}{2\pi [r_{be} // (r_{be} + R_s // R_L)] C_c}$$

**上限频率**

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_{ush}| = 20\lg|\dot{A}_{usm}| - 20\lg \sqrt{1 + (\frac{f}{f_H})^2} \\ \varphi = -180^\circ - \arctan \frac{f}{f_H} \end{cases}$$

$f = f_H$  时,  $20\lg|\dot{A}_{ush}|$  下降3dB,  $\varphi = -225^\circ$ ;  
 $f \gg f_H$  时,  $f$  每增大10倍,  $20\lg|\dot{A}_{ush}|$  下降20dB;  
 $f \rightarrow \infty$  时,  $|\dot{A}_{ush}| \rightarrow 0$ ,  $\varphi \rightarrow -270^\circ$ 。

### 四、电压放大倍数的波特图

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{A}_{usm}(j \frac{f}{f_L})}{(1 + j \frac{f}{f_L})(1 + j \frac{f}{f_H})} = \frac{\dot{A}_{usm}}{(1 + \frac{f_L}{j f})(1 + j \frac{f}{f_H})}$$

$f_L \ll f \ll f_H$  时,  $\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{usm}$  (中频放大倍数);  
 $f \ll f_L$  时,  $\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{usl}$  (低频放大倍数);  
 $f \gg f_H$  时,  $\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{ush}$  (高频放大倍数)。

### 8.6.3 多级放大电路的频率响应

$f_L > f_{L1}(f_{L2})$   
 $f_H < f_{H1}(f_{H2})$   
 $f_{bw} < f_{bw1}(f_{bw2})$

$$20\lg|\dot{A}_u| = 20\lg|\dot{A}_{u1}| + 20\lg|\dot{A}_{u2}|$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

$$\begin{cases} f_L > f_{Lk} \\ f_H < f_{Hk} \\ f_{bw} < f_{bwk} \end{cases} (k = 1 \sim n)$$

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_u| = \sum_{k=1}^n 20\lg|\dot{A}_{uk}| \\ \varphi = \sum_{k=1}^n \varphi_k \end{cases}$$

清华大学

### 多级放大电路的截止频率估算

$$f_L \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^n f_{Lk}^2} \quad \frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{1}{f_{Hk}^2}}$$

在多级放大电路中，若某级的下限频率远高于其它各级的下限频率，则可以认为整个电路的下限频率就是该级的下限频率；

若某级的上限频率远低于其它各级的上限频率，则可以认为整个电路的上限频率就是该级的上限频率。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 小测试

1、已知某放大电路的电压放大倍数的频率特性为

$$\dot{A}_u = \frac{1000(j\frac{f}{10})}{(1+j\frac{f}{10})(1+j\frac{f}{10^6})}$$

（式中， $f$  的单位为Hz）

表明其下限频率为（ ），上限频率为（ ），中频电压增益为（ ）dB，输出电压与输入电压在中频段的相位差为（ ）。

2、某放大电路的对数幅频特性如图，并已知中频段相移  $\phi_m = -180^\circ$ 。写出  $\dot{A}_u$  频率特性表达式。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 讨论

6、设电路各级均为共射放大电路，写出  $\dot{A}_u$  的表达式。

1、该放大电路为几级放大电路？  
2、耦合方式？  
3、在  $f = 10^4 \text{Hz}$  时，附加相移  $\phi' = ?$   
4、在  $f = 10^5 \text{Hz}$  时，附加相移  $\phi \approx ?$   
5、电路总的下限截止频率是多少？上限截止频率是多少？

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 小测试

某放大电路的电压放大倍数表达式为

$$\dot{A}_u = \frac{0.5f^2}{\left(1+j\frac{f}{2}\right)\left(1+j\frac{f}{100}\right)\left(1+j\frac{f}{10^5}\right)}$$

$f$  的单位为Hz

画出  $\dot{A}_u$  的幅频特性波特图，标明电压放大倍数、下限和上限截止频率。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

## 第六章 放大电路中的反馈

### §6.1 反馈的概念和判断

#### 一、反馈的基本概念

#### 1、什么是反馈

电子电路输出量的一部分或全部通过一定的方式引回到输入回路，影响输入量，称为反馈。

#### 2、正反馈和负反馈

从反馈的结果来判断，凡反馈的结果使输出量的变化减小（使净输入量减小）的为负反馈，否则为正反馈。

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn

清华大学

### 直流反馈和交流反馈

直流通路中存在的反馈为直流反馈，交流通路中存在的反馈为交流反馈。

#### 4、局部反馈和级间反馈

只对多级放大电路中某一级起反馈作用的称为局部反馈，将多级放大电路的输出量引回到其输入级的输入回路的为级间反馈，本章重点研究级间反馈。

直流反馈电阻  
交流反馈电阻

清华大学 hcbva@tsinghua.edu.cn



清华大学

## 一、交流负反馈的四种组态

### 1、电压反馈和电流反馈

将输出电压的一部分或全部引回到输入回路来影响净输入量的为**电压反馈**。

将输出电流的一部分或全部引回到输入回路来影响净输入量的为**电流反馈**。

描述放大电路和反馈网络在输出端的连接方式。

清华大学

## 2、串联反馈和并联反馈

描述放大电路和反馈网络在输入端的连接方式，即输入量、反馈量、净输入量的叠机关系。

$\dot{U}_i = \dot{U}_i' + \dot{U}_f$  一一以电压方式相互叠加，**串联反馈**。

$\dot{I}_i = \dot{I}_i' + \dot{I}_f$  一一以电流方式相互叠加，**并联反馈**。

清华大学

## 四种反馈组态 (电压、电流、串联、并联)

**电压串联负反馈**

**电流串联负反馈**

**电压并联负反馈**

**电流并联负反馈**

清华大学

## 反馈的判断

### 1、有无反馈：“找联系”

无反馈

无反馈

有反馈

有反馈

既在输入回路，又在输出回路，故引入反馈。

清华大学

## 直流反馈和交流反馈：“看通路”

直流反馈

交流反馈

交、直流反馈都有

清华大学

## 正、负反馈 (反馈极性) :

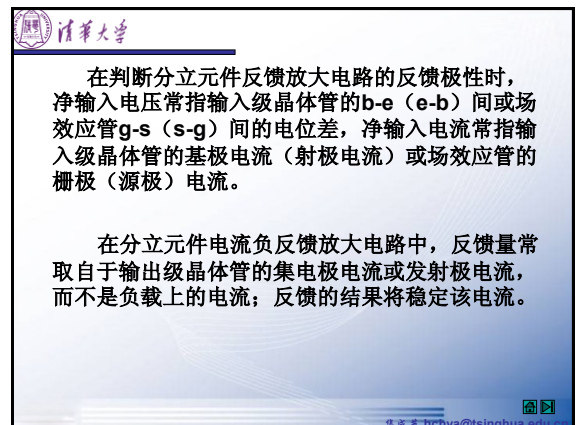
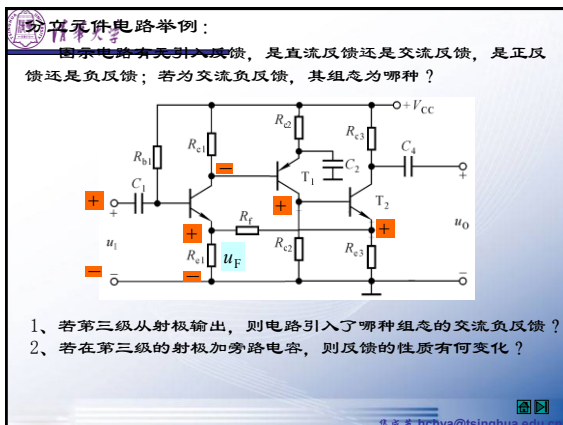
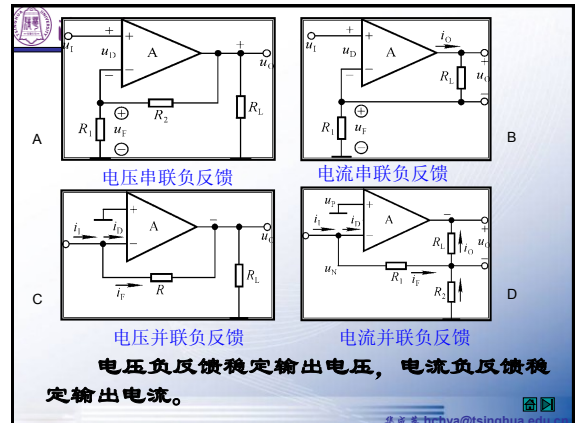
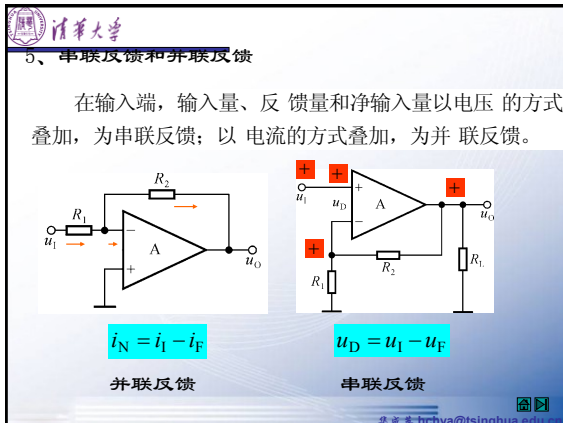
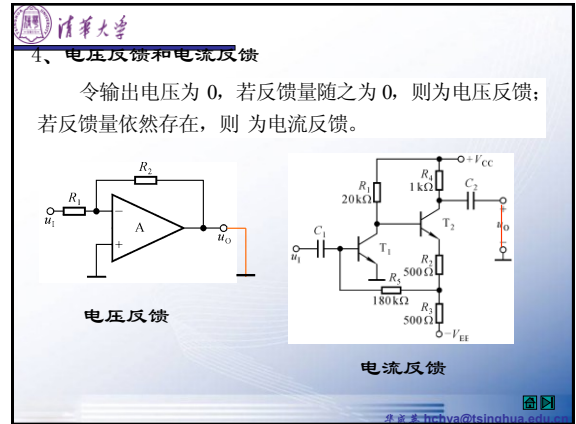
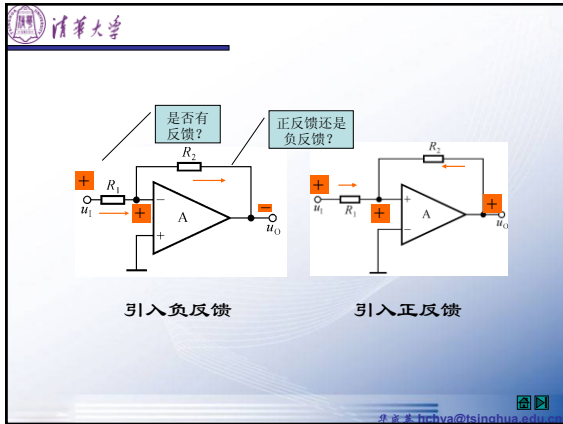
“看反馈的结果”，即净输入量的变化。

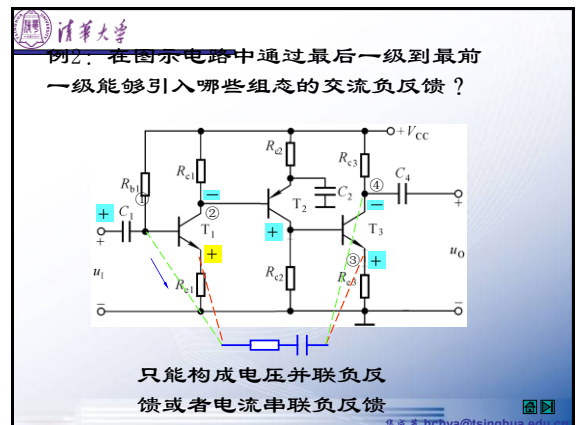
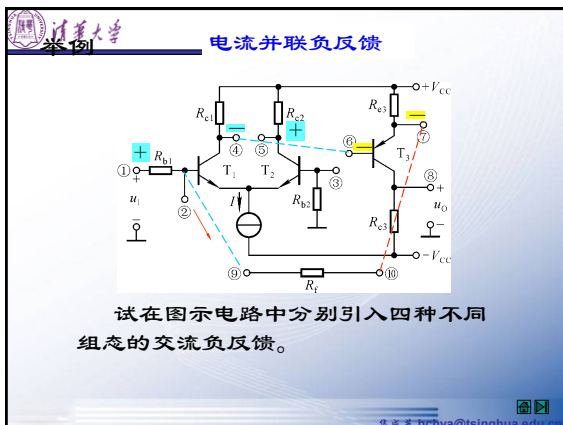
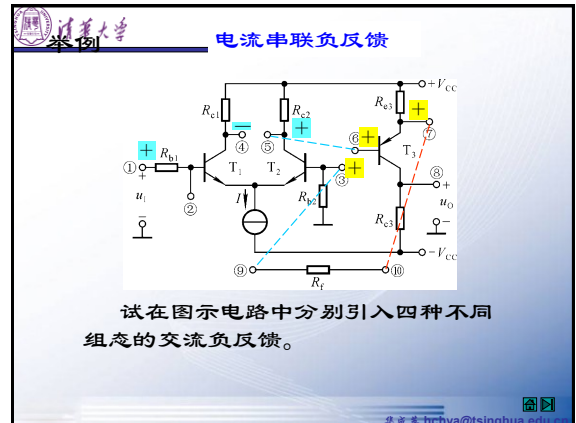
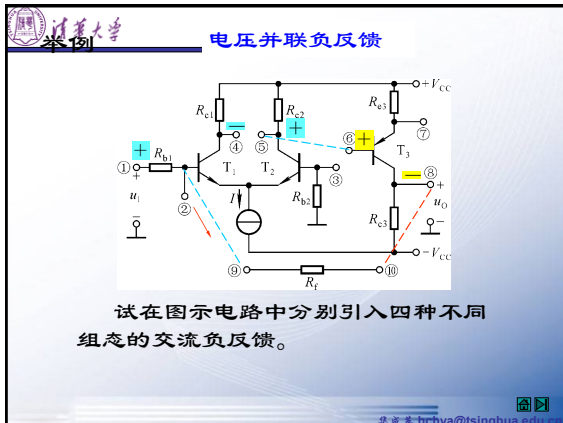
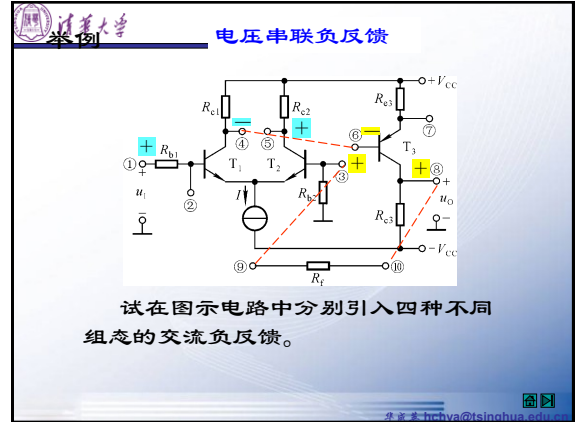
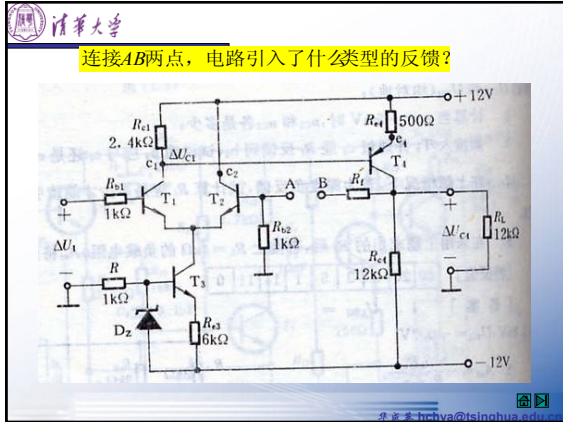
在判断集成运放构成的反馈放大电路的反馈极性时，净输入电压指的是集成运放两个输入端的电位差，净输入电流指的是同相输入端或反相输入端的电流。

瞬时极性法：

- 给定  $X_i$  的瞬时极性
- $X_o$  的极性
- $X_f$  的极性
- $\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_f$ 、 $\dot{X}_i'$  的叠加关系

$u_D = u_I - u_F$





## § 6.2 深度负反馈放大电路的估算

### 一、负反馈放大电路的方框图

决定反馈量和输出量关系的所有元件所组成的网络

反馈组态	$\dot{X}_o$	$\dot{X}_i$	$\dot{X}_f$	$\dot{X}_t$
电压串联负反馈	$\dot{U}_o$	$\dot{U}_i$	$\dot{U}_f$	$\dot{U}_t$
电压并联负反馈	$\dot{U}_o$	$\dot{I}_i$	$\dot{I}_f$	$\dot{I}_t$
电流串联负反馈	$\dot{I}_o$	$\dot{U}_i$	$\dot{U}_f$	$\dot{U}_t$
电流并联负反馈	$\dot{I}_o$	$\dot{I}_i$	$\dot{I}_f$	$\dot{I}_t$

## 二、负反馈放大电路放大倍数的一般表达式

基本放大电路的放大倍数:  $\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$

反馈系数:  $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

负反馈放大电路的放大倍数:  $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$

$\dot{X}_i - \dot{X}_f = \dot{X}_i'$

$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i + \dot{X}_f} = \frac{\dot{A}\dot{X}_i'}{\dot{X}_i' + \dot{A}\dot{F}\dot{X}_i'}$

反馈组态

	$\dot{F}$	$\dot{A}_f$
电压串联负反馈	$\dot{U}_f/\dot{U}_o$	$\dot{U}_o/\dot{U}_i$
电压并联负反馈	$\dot{I}_f/\dot{U}_o$	$\dot{U}_o/\dot{I}_i$
电流串联负反馈	$\dot{U}_f/\dot{I}_o$	$\dot{I}_o/\dot{U}_i$
电流并联负反馈	$\dot{I}_f/\dot{I}_o$	$\dot{I}_o/\dot{I}_i$

环路放大倍数:  $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$

## 三、深度负反馈的实质

$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$

若  $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ , 则  $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$

由于  $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$ , 故  $\dot{A}_f \approx \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_f}$

说明  $\dot{X}_i \approx \dot{X}_f$ . 可见深度负反馈的实质是在近似分析中忽略净输入量。

当电路引入深度串联负反馈时,  $\dot{U}_i \approx \dot{U}_f$ , 认为净输入量  $\dot{U}_i$  可忽略。

当电路引入深度并联负反馈时,  $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$ , 认为净输入量  $\dot{I}_i$  可忽略不计。

应当指出, 通常所说的负反馈放大电路, 是指中频段的反馈极性, 当信号频率进入低频段或高频段时, 由于产生附加相移, 反馈极性可能发生变化。

## 四、深度负反馈条件下电压放大倍数的估算

### 1、电压串联负反馈电路

$\dot{F}_{uf} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

$\dot{A}_{uf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{uf}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

## 2、电压并联负反馈电路

$\dot{F}_{uf} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_2}$

$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f} = -\frac{1}{R_2}$

实际上, 电路往往是一个具有内阻的信号源, 且  $\dot{U}_s \approx \dot{I}_i R_s$ , 由于  $\dot{I}_i \approx \dot{I}_f$ ,  $\dot{I}_f$  趋于零,  $\dot{U}_s \approx \dot{I}_i R_s$ , 则电压放大倍数  $\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_f R_s} = -\frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{R_2}$