

# 模拟电子电路学习教程

-----单片机自学网版权所有-----

编制：单片机自学网

网址 <http://www.c51.cn>

<http://www.c51mcu.com>

E-mail:[c51cn@163.com](mailto:c51cn@163.com)

备用邮箱：[h1-ddw\\_218@163.com](mailto:h1-ddw_218@163.com)

# 目 录

## 第一章 半导体基础知识

第一节：半导体的基础知识

第二节：P-N 结

第三节：半导体二极管

第四节：导体三极管

## 第二章 放大电路分析基础

第一节：放大电路工作原理

第二节：放大电路的直流工作状态

第三节：放大电路的动态分析

第四节：静态工作点的稳定及其偏置电路

第五节：多级放大电路

第六节：放大电路的频率特性

## 第三章 场效应管放大电路

第一节：场效应管的类型

第二节：场效应管的主要参数和特点

第三节：总结

## 第四章 负反馈放大电路

第一节：负反馈

第二节：负反馈对放大电路性能的影响

第三节：负反馈放大电路的计算？

第四节：总结？

## 第五章 集成运算放大器

第一节：差动放大电路

第二节：长尾式差动放大电路

## 第六章 集成运算放大器的应用

第一节：集成运放的应用基础

第二节：运算电路

第三节：有源滤波电路和电压比较器

第四节：总结

## 第七章：波形发生与变换电路

第一节：非正弦波产生电路

第二节：正弦波产生电路

第三节：总结

## 第八章：低频功率放大电路

第一节：低频功率放大电路的概述

第二节：互补对称功率放大电路

第三节：总结

# 第一章 半导体的基础知识

## 第一节：半导体基本知识

我们这一章要了解的概念有：本征半导体、P型半导体、N型半导体及它们各自的特征。

在学习半导体之前我们还要了解一些物质导电性的基础知识：物质为什么会导电

### 一：本征半导体

纯净晶体结构的半导体我们称之为本征半导体。常用的半导体材料有：硅和锗。它们都是四价元素，原子结构的最外层轨道上有四个价电子，当把硅或锗制成晶体时，它们是靠共价键的作用而紧密联系在一起。

共价键中的一些价电子由于热运动获得一些能量，从而摆脱共价键的约束成为自由电子，同时在共价键上留下空位，我们称这些空位为空穴，它带正电。**我们用晶体结构示意图来描述一下；如图（1）所示：图中的虚线代表共价键。**

在外电场作用下，自由电子产生定向移动，形成电子电流；

同时价电子也按一定的方向一次填补空穴，从而使空穴产生定向移动，形成空穴电流。

因此，在晶体中存在两种载流子，即带负电自由电子和带正电空穴，它们是成对出现的。

### 二：杂质半导体

在本征半导体中两种载流子的浓度很低，因此导电性很差。我们向晶体中有控制的掺入特定的杂质来改变它的导电性，这种半导体被称为杂质半导体。

#### 1. N型半导体

在本征半导体中，掺入5价元素，使晶体中某些原子被杂质原子所代替，因为杂质原子最外层有5个价电子，它与周围原子形成共价键后，还多余一个自由电子，因此使其中的空穴

的浓度远小于自由电子的浓度。但是，电子的浓度与空穴的浓度的乘积是一个常数，与掺杂无关。

在N型半导体中自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

#### 2. P型半导体

在本征半导体中，掺入3价元素，晶体中的某些原子被杂质原子代替，但是杂质原子的最外层只有3个价电子，它与周围的原子形成共价键后，还多余一个空穴，因此使其中的空穴浓度远大于自由电子的浓度。在P型半导体中，自由电子是少数载流子，空穴使多数载流子。

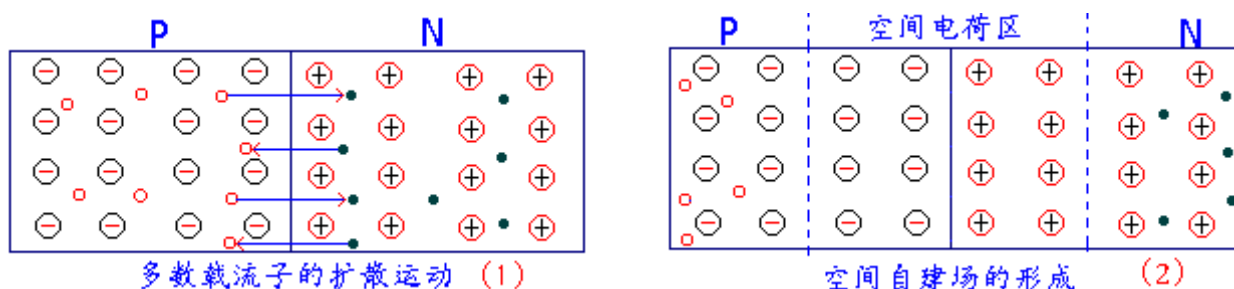
**第二节：PN 结****PN 结**

我们通过现代工艺，把一块本征半导体的一边形成 P 型半导体，另一边形成 N 型半导体，于是这两种半导体的交界处就形成了 P—N 结，它是构成其它半导体的基础，我们要掌握好它的特性！

**异形半导体接触现象**

在形成的 P—N 结中，由于两侧的电子和空穴的浓度相差很大，因此它们会产生扩散运动：电子从 N 区向 P 区扩散；空穴从 P 区向 N 区扩散。因为它们都是带电粒子，它们向另一侧扩散的同时在 N 区留下了带正电的空穴，在 P 区留下了带负电的杂质离子，这样就形成了空间电荷区，也就是形成了电场(自建场)。

它们的形成过程如图 (1)，(2) 所示



在电场的作用下，载流子将作漂移运动，它的运动方向与扩散运动的方向相反，阻止扩散运动。电场的强弱与扩散的程度有关，扩散的越多，电场越强，同时对扩散运动的阻力也越大，当扩散运动与漂移运动相等时，通过界面的载流子为 0。此时，PN 结的交界区就形成一个缺少载流子的高阻区，我们又把它称为阻挡层或耗尽层。

**PN 结的单向导电性**

我们在 PN 结两端加不同方向的电压，可以破坏它原来的平衡，从而使它呈现出单向导电性。

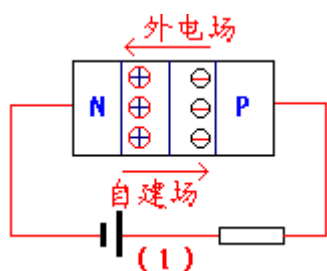
**1.PN 结外加正向电压**

PN 结外加正向电压的接法是 P 区接电源的正极，N 区接电源的负极。这时外加电压形成电场的方向与自建场的方向相反，从而使阻挡层变窄，扩散作用大于漂移作用，多数载流子向对方区域扩散形成正向电流，方向是从 P 区指向 N 区。如图 (1) 所示 这时的 PN 结处于导通状态，它所呈现的电阻为正向电阻，正向

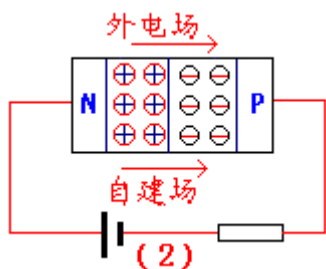
电压越大，电流也越大。它的关系是指数关系： $I_D = I_S e^{\frac{U}{U_T}}$

其中： $I_D$  为流过 PN 结的电流， $U$  为 PN 结两端的电压， $U_T = kT/q$  称为温度电压当量，其中， $k$  为波尔兹曼常数， $T$  为绝对温度， $q$  为电子电量，在室温下 (300K) 时  $U_T = 26\text{mv}$ ， $I_S$  为反向饱和电流。

这个公式我们要掌握好！

**2.PN 结外加反向电压**

它的接法与正向相反，即 P 区接电源的负极，N 区接电源的正极。此时的外加电压形成电场的方向与自建场的方向相同，从而使阻挡层变宽，漂移作用大于扩散作用，少数载流子在电场的作用下，形成漂移电流，它的方向与正向电压的方向相反，所以又称为反向电流。因反向电流是少数载流子形成，故反向电流很小，即使反向电压再增加，少数载流子也不会增加，反向电压也不会增加，因此它又被称为反向饱和电流。即： $I_D = -I_S$



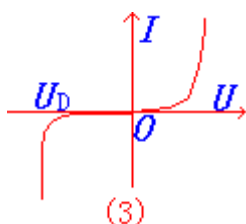
此时，PN 结处于截止状态，呈现的电阻为反向电阻，而且阻值很高。

由以上我们可以看出：PN 结在正向电压作用下，处于导通状态，在反向电压的作用下，处于截止状态，因此 PN 结具有单向导电性。

它的电流和电压的关系通式为：

$$I_D = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

它被称为伏安特性方程，如图（3）所示为伏安特性曲线。



### PN 结的击穿

PN 结处于反向偏置时，在一定的电压范围内，流过 PN 结的电流很小，但电压超过某一数值时，反向电流急剧增加，这种现象我们就称为反向击穿。

击穿形式分为两种：雪崩击穿和齐纳击穿。

对于硅材料的 PN 结来说，击穿电压  $> 7V$  时为雪崩击穿， $< 4V$  时为齐纳击穿。在  $4V$  与  $7V$  之间，两种击穿都有。这种现象破坏了 PN 结的单向导电性，我们在使用时要避免。

击穿并不意味着 PN 结烧坏。

### PN 结的电容效应

由于电压的变化将引起电荷的变化，从而出现电容效应，PN 结内部有电荷的变化，因此它具有电容效应，它的电容效应有两种：势垒电容和扩散电容。

势垒电容是由阻挡层内的空间电荷引起的。

扩散电容是 PN 结在正向电压的作用下，多数载流子在扩散过程中引起电荷的积累而产生的。

PN 结正偏时，扩散电容起主要作用，PN 结反偏时，势垒电容起主要作用。

## 第三节：半导体二极管

### 半导体二极管

半导体二极管是由 PN 结加上引线 and 管壳构成的。它的类型很多。

按制造材料分：硅二极管和锗二极管。

按管子的结构来分有：点接触型二极管和面接触型二极管。

二极管的逻辑符号为：

## 1. 二极管的特性

### 正向特性

当正向电压低于某一数值时，正向电流很小，只有当正向电压高于某一值时，二极管才有明显的正向电流，这个电压被称为导通电压，我们又称它为门限电压或死区电压，一般用  $U_{ON}$  表示，在室温下，硅管的  $U_{ON}$  约为 0.6---0.8V，锗管的  $U_{ON}$  约为 0.1--0.3v，我们一般认为当正向电压大于  $U_{ON}$  时，二极管才导通。否则截止。

### 反向特性

二极管的反向电压一定时，反向电流很小，而且变化不大（反向饱和电流），但反向电压大于某一数值时，反向电流急剧变大，产生击穿。

### 温度特性

二极管对温度很敏感，在室温附近，温度每升高 1 度，正向压将减小 2--2.5mV，温度每升高 10 度，反向电流约增加一倍。

## 2. 二极管的主要参数

我们描述器件特性的物理量，称为器件的特性。二极管的特性有：

**最大整流电流  $I_F$** ：它是二极管允许通过的最大正向平均电流。

**最大反向工作电压  $U_R$** ：它是二极管允许的最大工作电压，我们一般取击穿电压的一般作  $U_R$

**反向电流  $I_R$** ：二极管未击穿时的电流，它越小，二极管的单向导电性越好。

**最高工作频率  $f_M$** ：它的值取决于 PN 结电容的大小，电容越大，频率约高。

**二极管的直流电阻  $R_D$** ：加在管子两端的直流电压与直流电流之比，我们就称为直流电阻，它可表示为： $R_D=U_F/I_F$  它是非线性的，正反向阻值相差越大，二极管的性能越好。

**二极管的交流电阻  $r_d$** ：在二极管工作点附近电压的微变化与相应的微变化电流值之比，就称为该点的交流电阻。

## 稳压二极管

稳压二极管是利用二极管的击穿特性。它是因为二极管工作在反向击穿区，反向电流变化很大的情况下，反向电压变化则很小，从而表现出很好的稳压特性。

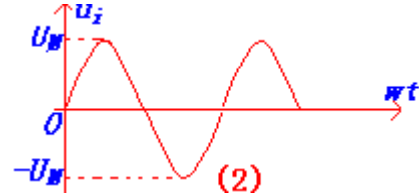
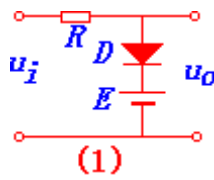
## 二极管的应用

我们运用二极管主要是利用它的单向导电性。它导通时，我们可用短线来代替它，它截止时，我们可认为它断路。

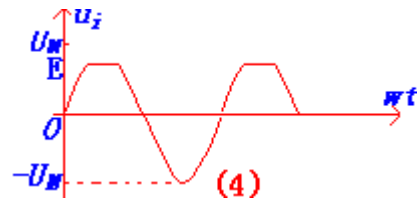
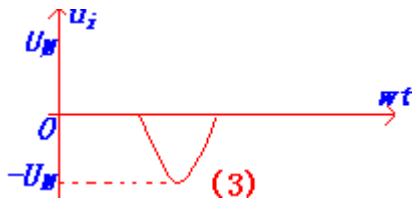
### 1. 限幅电路

当输入信号电压在一定范围内变化时, 输出电压也随着输入电压相应的变化; 当输入电压高于某一个数值时, 输出电压保持不变, 这就是限幅电路。我们把开始不变的电压称为限幅电平。它分为上限幅和下限幅。

例1. 试分析图(1)所示的限幅电路, 输入电压的波形为图(2), 画出它的限幅电路的波形

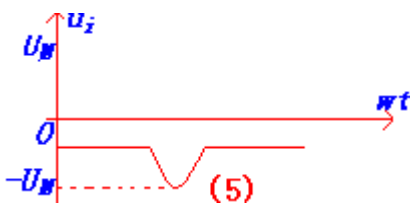


(1)  $E=0$  时限幅电平为  $0V$ 。  $u_i > 0$  时二极管导通,  $u_o = 0$ ,  $u_i < 0$  时, 二极管截止,  $u_o = u_i$ , 它的波形图: 如图(3)所示



(2) 当  $0 < E < U_M$  时, 限幅电平为  $+E$ 。  $u_i < +E$  时, 二极管截止,  $u_o = u_i$ ;  $u_i > +E$  时, 二极管导通,  $u_o = E$ , 它的波形图: 如图(4)所示

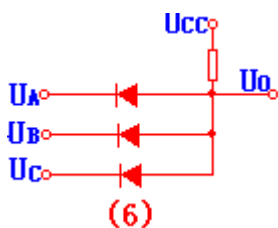
(3) 当  $-U_M < E < 0$  时, 限幅电平为负数, 它的波形图: 如图(5)所示



## 二极管门电路

二极管组成的门电路, 可实现逻辑运算。如图(6)所示的电路, 只要有一条电路输入为低电平时, 输出即为低电平, 仅当全部输入为高电平时, 输出才为高电平。实现逻辑“与”运算。



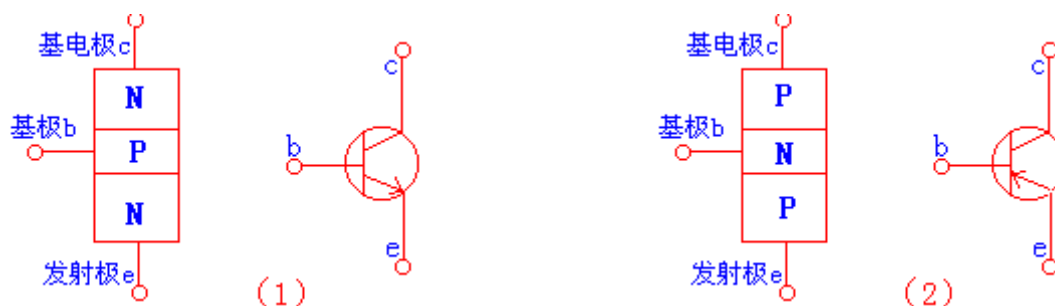


#### 第四节：半导体三极管

三极管是组成各电子电路的核心器件，它由三个电极。它是我们学习的重点

##### 一：三极管的结构及类型

通过工艺的方法,把两个二极管背靠背的连接起来级组成了三极管。按 PN 结的组合方式有 PNP 型和 NPN 型，它们的结构示意图和符号图分别为：如图（1）、（2）所示



不管是什麼样的三极管，它们均包含三个区：发射区，基区，集电区，同时相应的引出三个电极：发射极，基极，集电极。同时又在两两交界区形成 PN 结，分别是发射结和基区结。

##### 二：三极管的放大作用（这一问题为重点）

我们知道，把两个二极管背靠背的连在一起，是没有放大作用的，要想使它具有放大作用，必须做到以下几点：

1. 发射区中掺杂
2. 基区必须很薄
3. 基电结的面积应很大
4. 工作时：发射结应正向偏置，集电结应反向偏置

##### 载流子的传输过程

因为发射结正向偏置，且发射区进行重掺杂，所以发射区的多数载流子扩散注入至基区，又由于集电结的反向作用，故注入至基区的载流子在基区形成浓度差，因此这些载流子从基区扩散至集电结，被电场拉至集电区形成集电极电流。而留在基区的很少，因为基区做的很薄。

我们再用图形来说明一下，如图（3）所示：

电流的分配关系

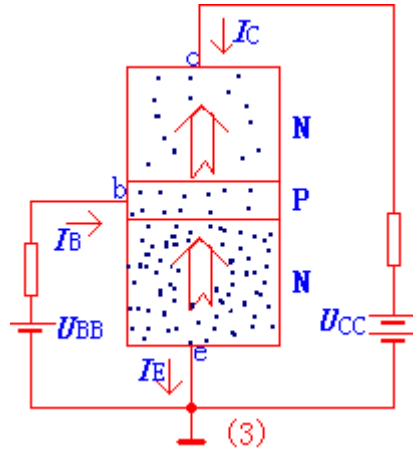
由于载流子的运动，从而产生相应电流，它们的关系如下：

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CBO}$$

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



其中： $I_{CBO}$  为发射结少数载流子形成的反向饱和电流； $I_{CBO}$  为  $I_B=0$  时，集电极和发射极之间的穿透电流。

$\alpha$  为共基极电流的放大系数， $\beta$  为共发射极电流的放大系数。它们可定义为：

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

放大系数有两种（直流和交流），但我们一般认为，它们二者是相等的，不区分它们。

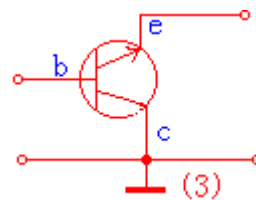
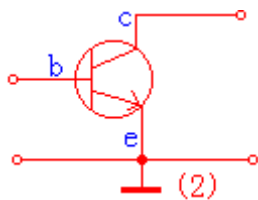
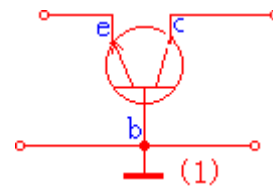
三：三极管的特性曲线

它的特性曲线与它的接法有关，在学习之前，我们先来学习一下它的三种不同接法。

(1) 共基极，如图 (1) 所示

(2) 共发射极 如图 (2) 所示

(3) 共集电极 如图 (3) 所示

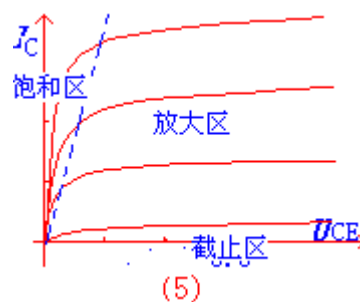
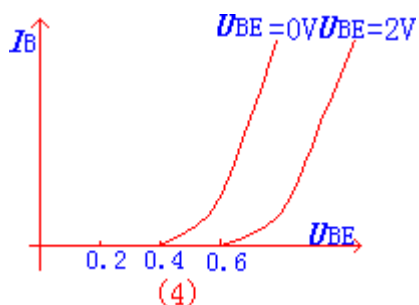


我们以 NPN 管共发射极为例：

1. 输入特性

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{常数}}$$

它与 PN 结的正向特性相似，三极管的两个 PN 结相互影响，因此，输出电压  $U_{CE}$  对输入特性有影响，且  $U_{CE} > 1$  时这两个 PN 结的输入特性基本重合。我们用  $U_{CE}=0$  和  $U_{CE} \geq 1$  两条曲线表示，如图 (4) 所示



## 2. 输出特性

$$I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$$

它的输出特性可分为三个区：(如图(5)的特性曲线)

- (1)截止区:  $I_B \leq 0$  时, 此时的集电极电流近似为零, 管子的集电极电压等于电源电压, 两个结均反偏
- (2)饱和区: 此时两个结均处于正向偏置,  $U_{CE} = 0.3V$
- (3)放大区: 此时  $I_C = \beta I_B$ ,  $I_C$  基本不随  $U_{CE}$  变化而变化, 此时发射结正偏, 集电结反偏。

## 四: 三极管主要参数

### 1. 放大系数

它主要是表征管子放大能力。它有共基极的放大系数和共发射极的放大系数。它们二者的关系是:

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \qquad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

### 2. 极间的反向电流 (它们是有少数载流子形成的)

- (1): 基极--基极的反向饱和电流。
- (2)  $I_{CEO}$ : 穿透电流, 它与  $I_{CBO}$  关系为:  $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$

## 五: 参数与温度的关系

由于半导体的载流子受温度影响, 因此三极管的参数受温度影响, 温度上升, 输入特性曲线向左移, 基极的电流不变, 基极与发射极之间的电压降低。输出特性曲线上移。

温度升高, 放大系数也增加。

# 第二章 放大电路分析基础

在我们的生活中, 经常会把一些微弱的信号放大到便于测量和利用的程度。这就要用到放大电路, 它是我们这门课程的重点。放大的基础就是能量转换。

在学习时我们把这一章的课程分为六节, 它们分别是:

- 放大电路工作原理
- 放大电路的直流工作状态
- 放大电路的动态分析
- 静态工作点的稳定及其偏置电路

- 多级放大电路
- 放大电路的频率特性

### 第一节：放大电路工作原理

我们知道三极管可以通过控制基极的电流来控制集电极的电流，来达到放大的目的。放大电路就是利用三极管的这种特性来组成放大电路。我们下面以共发射极的接法为例来说明一下。

#### 一：放大电路的组成原理

放大电路的组成原理（应具备的条件）

- (1): 放大器件工作在放大区（三极管的发射结正向偏置，集电结反向偏置）
- (2): 输入信号能输送至放大器件的输入端（三极管的发射结）
- (3): 有信号电压输出。

判断放大电路是否具有放大作用，就是根据这几条，它们必须同时具备。

例 1: 判断图（1）电路是否具有放大作用



解：图（1）a 不能放大，因为是 NPN 三极管，所加的电压  $U_{BE}$  不满足条件（1），所以不具有放大作用。图（1）b 具有放大作用。

#### 二：直流通路和交流通路

在分析放大电路时有两类问题：直流问题和交流问题。

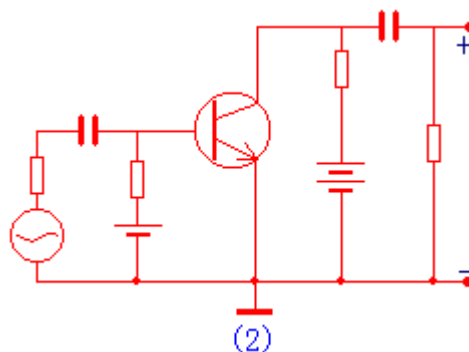
- (1) 直流通路：将放大电路中的电容视为开路，电感视为短路即得。它又被称为静态分析。
- (2) 交流通路：将放大电路中的电容视为短路，电感视为开路，直流电源视为短路即得。它又被称为动态分析。

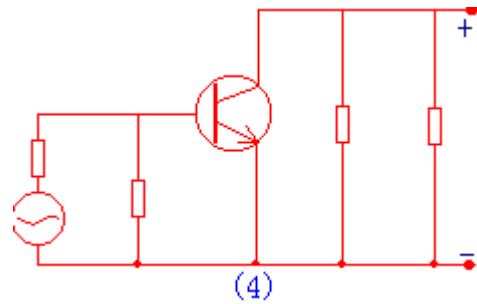
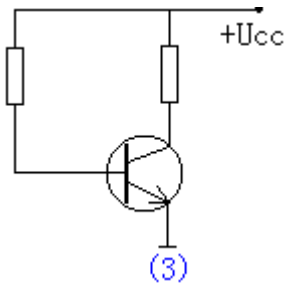
例 2: 试画出图（2）所示电路的直流通路和交流通路。

解：图（2）所示电路的

直流通路如图（3）所示：

交流通路如图（4）所示：





## 第二节：放大电路的直流工作状态

这一节是本章的重点内容，在这一节中我们要掌握公式法计算 Q 点和图形法计算 Q 点

在学习之前，我们先来了解一个概念：

什么是 Q 点？它就是直流工作点，又称为静态工作点，简称 Q 点。我们在进行静态分析时，主要是求基极直流电流  $I_B$ 、集电极直流电流  $I_C$ 、集电极与发射极间的直流电压  $U_{CE}$

### 一：公式法计算 Q 点

我们可以根据放大电路的直流通路，估算出放大电路的静态工作点。下面把求  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$  的公式列出来

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

三极管导通时， $U_{BE}$  的变化很小，可视为常数，

$$I_C = \beta I_B$$

我们一般认为：硅管为 0.7V

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

锗管为 0.2V

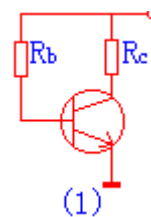
例 1:估算图(1)放大电路的静态工作点。其中  $R_B=120$  千欧， $R_C=1$  千欧， $U_{CC}=24$  伏， $\beta=50$ ，三极管为硅管

解：

$$I_B = (U_{CC} - U_{BE}) / R_B = 24 - 0.7 / 120000 = 0.194 \text{ (mA)}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 * 0.194 = 9.7 \text{ (mA)}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = 24 - 9.7 * 1 = 14.3 \text{ V}$$



### 二：图解法计算 Q 点

三极管的电流、电压关系可用输入特性曲线和输出特性曲线表示，我们可以在特性曲线上，直接用作图的方法来确定静态工作点。用图解法的关键是正确的作出直流负载线，通过直流负载线与  $i_B = I_{BQ}$  的特性曲线的交点，即为 Q 点。读出它的坐标即得  $I_C$  和  $U_{CE}$

图解法求 Q 点的步骤为：

(1)：通过直流负载方程画出直流负载线，（直流负载方程为  $U_{CE} = U_{CC} - i_C R_C$ ）

(2): 由基极回路求出  $I_B$

(3): 找出  $i_B=I_B$  这一条输出特性曲线与直流负载线的交点就是 Q 点。读出 Q 点的坐标即为所求。

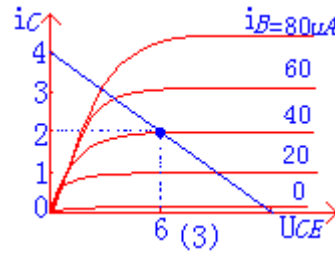
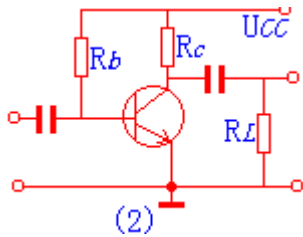
例 2: 如图 (2) 所示电路, 已知  $R_b=280$  千欧,  $R_c=3$  千欧,  $U_{cc}=12$  伏, 三极管的输出特性曲线如图 (3) 所示, 试用图解法确定静态工作点。

解: (1) 画直流负载线: 因直流负载方程为  $U_{CE}=U_{CC}-i_C R_C$

$i_C=0$ ,  $U_{CE}=U_{CC}=12V$ ;  $U_{CE}=4mA$ ,  $i_C=U_{CC}/R_C=4mA$ , 连接这两点, 即得直流负载线: 如图 (3) 中的兰线

(2) 通过基极输入回路, 求得  $I_B=(U_{CC}-U_{BE})/R_C=40\mu A$

(3) 找出 Q 点 (如图 (3) 所示), 因此  $I_C=2mA$ ;  $U_{CE}=6V$



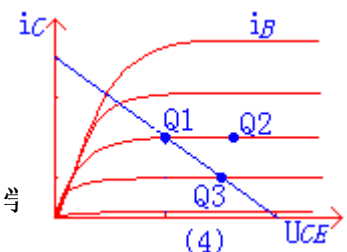
### 三: 电路参数对静态工作点的影响

静态工作点的位置在实际应用中很重要, 它与电路参数有关。下面我们分析一下电路参数  $R_b$ ,  $R_c$ ,  $U_{cc}$  对静态工作点的影响。

改变 $R_b$	改变 $R_c$	改变 $U_{cc}$
$R_b$ 变化, 只对 $I_B$ 有影响。 $R_b$ 增大, $I_B$ 减小, 工作点沿直流负载线下移。	$R_c$ 变化, 只改变负载线的纵坐标 $R_c$ 增大, 负载线的纵坐标上移, 工作点沿 $i_B=I_B$ 这条特性曲线右移	$U_{cc}$ 变化, $I_B$ 和直流负载线同时变化 $U_{cc}$ 增大, $I_B$ 增大, 直流负载线水平向右移动, 工作点向右上方移动
$R_b$ 减小, $I_B$ 增大, 工作点沿直流负载线上移	$R_c$ 减小, 负载线的纵坐标下移, 工作点沿 $i_B=I_B$ 这条特性曲线左移	$U_{cc}$ 减小, $I_B$ 减小, 直流负载线水平向左移动, 工作点向左下方移动

例 3: 如图 (4) 所示: 要使工作点由 Q1 变到 Q2 点应使 ( )

- A.  $R_c$  增大
- B.  $R_b$  增大
- C.  $U_{cc}$  增大
- D.  $R_c$  减小



答案为：A

要使工作点由 Q1 变到 Q3 点应使( )

A.Rb 增大

B.Rc 增大

C.Rb 减小

D.Rc 减小

答案为：A

注意：在实际应用中，主要是通过改变电阻 Rb 来改变静态工作点。

### 第三节：放大电路的动态分析

这一节是本章也是本课程的重点内容。我们把加进的输入交流信号时的状态称为动态，这一节我们主要学习放大电路动态分析的两种方法：图解法和微变等效电路法。

我们对放大电路进行动态分析的任务是求出电压的放大倍数、输入电阻、和输出电阻。

#### 一：图解法分析动态特性

##### 1.交流负载线的画法

交流负载线的特点：

- 必须通过静态工作点

交流负载线的斜率由  $R''_L$  表示( $R''_L=R_c/R_L$ )

交流负载线的画法 (有两种)：

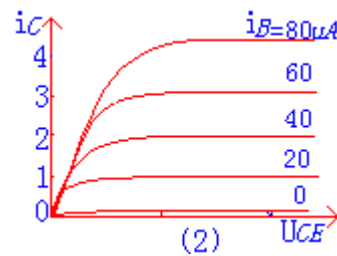
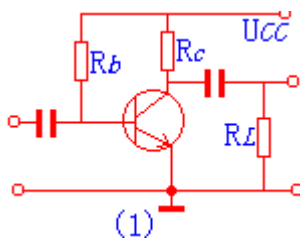
(1) 先作出直流负载线，找出 Q 点；

出一条斜率为  $R''_L$  的辅助线，然后过 Q 点作它的平行线即得。(此法为点斜式)

(2) 先求出  $U''_{cc}$  坐标的截距 (通过方程  $U''_{cc}=U_{ce}+I_cR''_L$ )

连接 Q 点和  $U''_{cc}$  点即为交流负载线。(此法为两点式)

例 1：作出图 (1) 所示电路的交流负载线。已知特性曲线如图 (2) 所示， $U_{cc}=12V$ ， $R_c=3$  千欧， $R_L=3$  千欧， $R_b=280$  千欧。



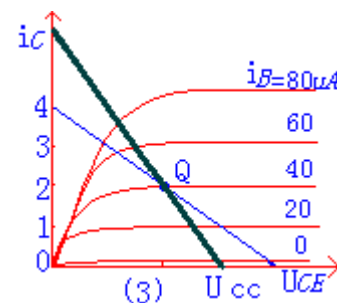
解：(1) 作出直流负载线，求出点 Q。

(2) 求出点  $U''_{cc}$ 。

$$U''_{cc}=U_{ce}+I_cR''_L=6+1.5*2=9V$$

(3) 连接点 Q 和点  $U''_{cc}$  即得交流负载线 (图

中黑线即为所求)



## 二：放大电路的非线性失真

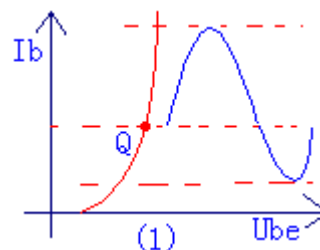
在使用放大电路时，我们一般是要求输出信号尽可能的大，但是它要受到三极管非线性的限制。有时输入信号过大或者工作点选择不恰当，输出电压波形就会产生失真。这种失真这是由于三极管的非线性引起的，所以它被称为非线性失真。

### 1.输入信号过大引起的非线性失真.

它主要表现在输入特性的起始弯曲部分，输出特性的间距不匀，当输入又比较大时，就会使  $I_b$ 、 $U_{ce}$  和  $I_c$  的正负半周不对称，即产生非线性失真。如图（1）所示

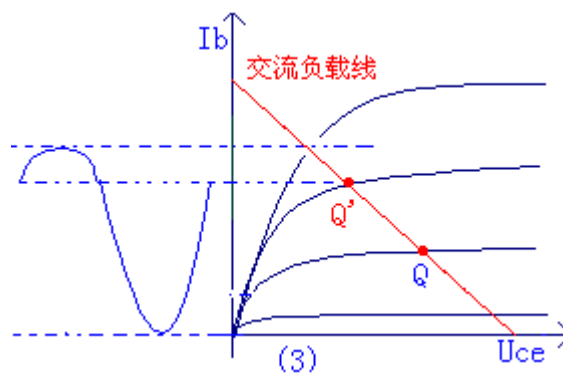
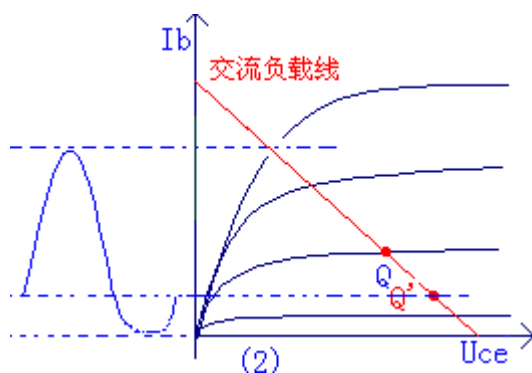
### 2. 工作点不合适引起的失真

当工作点设置过低，在输入信号的负半周，工作状态进入截止区，从而引起  $I_b$ 、 $U_{ce}$  和  $I_c$  的波形失真，称为截止失真（对于 PNP 型来说）如图（2）所示



所示

当工作点设置过高，在输入信号的正半周，工作状态进入饱和区，此时  $I_b$  继续增大而  $I_c$  不再随之增大，因此引起  $I_c$  和  $U_{ce}$  的波形失真，称为饱和失真。如图（3）所示



由于放大电路有失真问题，因此它存在最大不失真输出电压幅值  $U_{om}$ 。最大不失真输出电压是指：当工作状态一定的前提下，逐渐增大输入信号，三极管还没有进入截止或饱和时，输出所能获得的最大电压输出。

当电压受饱和区限制时  $U_{om} = U_{ce} - u_{ce}$ ，当电压受截止区限制时  $U_{om} = I_c * R''_L$

通过上面学习，我们已经了解图解法分析放大电路的基本知识，但是它对电压的放大倍数、输入电阻、输出电阻的计算有很多不足之处。这一页我们学习另外一种分析方法：微变等效电路法

## 三：微变等效电路法



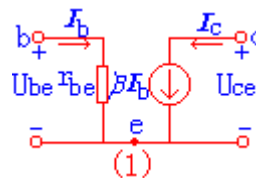
我们采用微变等效电路法的思想是：当信号变化的范围很小（微变）时，可以认为三极管电压、电流变化量之间的关系是线性的。

通过上述思想我们就可以把含有非线性元件（如三极管）的放大电路，转换为我们熟悉的线性电路，这样我们就可以利用电路分析的各种方法来求解了。

在应用中我们把三极管等效为图（1）所示的电路

其中： $I_e = (1 + \beta) I_b$

$r_{be}$  为基极和发射极之间的等效电阻



#### 四：三种基本组态放大电路的分析（微变电路的应用）

微变等效电路主要用于对放大电路的动态特性分析。三极管有三种接法，因此放大电路也有三种基本组态。我们衡量放大电路的性能是通过性能指标来衡量的！

##### 1. 放大电路的性能指标（我们简要的介绍几种）

- 电压放大倍数  $A_u$

它是用来衡量放大电路的电压放大能力。它可定义为输出电压的幅值与输入电压的幅值之比

$$A_u = U_o / U_i$$

电压源放大倍数  $A_{us}$  是表示输出电压与信号源电压值比，它就是考虑了信号源内阻  $R_s$  影响时的  $A_u$

$$A_{us} = U_o / U_s$$

- 电流放大倍数  $A_i$

它是用来衡量放大电路的电流放大能力，值越大表明放大能力越好。它可定义为输出电流  $I_o$  和输入电流  $I_i$  之比

$$A_i = I_o / I_i$$

- 输入电阻  $r_i$

它是用来衡量放大电路对输入信号源的影响。它可表示为输入电压与输入电流之比

$$r_i = U_i / I_i$$

- 输出电阻  $r_o$

它是用来衡量放大电路所能驱动负载的能力。从输出端看进去的等效电阻就是输出电阻。下面我们用微变等效电路法对放大电路进行分析。

(4) 输出电阻

$$r_o = R_c$$

注意:  $r_o$  常用来带负载  $R_L$  的能力, 我们在求它时不应含  $R_L$ , 应将其断开。

2. 共 c 极放大电路

如图 (3) 所示电路, 试用微变等效电路法分析它的  $A_u$ 、 $A_i$ 、 $r_o$ 、 $r_i$

分析为: 其等效电路图为: 如图 (4) 所示

(1) 电压放大倍数  $A_u$

因为:  $U_o = (1 + \beta) I_b R'_e$

$$R'_e = R_e // R_L$$

$$U_i = I_b r_{be} + (1 + \beta) R'_e I_b$$

所以 
$$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_e}{r_{be} + (1 + \beta) R'_e}$$

(2) 电流放大倍数  $A_i$

因为  $I_o = I_e = (1 + \beta) I_b$

$$I_i = I_b$$

所以:  $A_i = I_o / I_b = (1 + \beta)$

(3) 输入电阻  $r_i$

因为:  $r_i = R_b // r'_i$

$$r'_i = U_i / I_b = r_{be} + (1 + \beta) R'_e$$

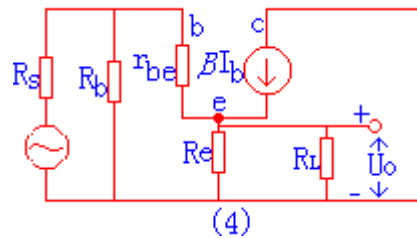
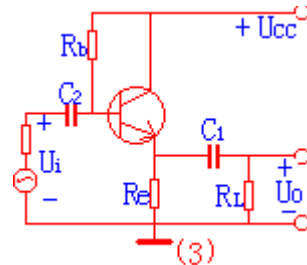
所以:  $r_i = R_b // [r_{be} + (1 + \beta) R'_e]$

(4) 输出电阻  $r_o$

按输出电阻的计算方法, 进行计算

$$r_o = R_e // [(R'_s + r_{be}) / (1 + \beta)]$$

由此我们可以看出  $r_o$  的值很小, 这是共 C 极电路的一个特点。

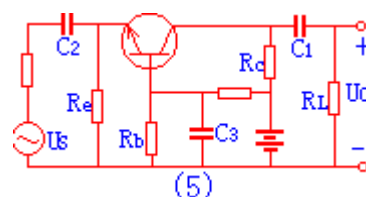


3. 共 b 极放大电路

如图 (5) 所示电路, 试用微变等效电路法分析它的  $A_u$ 、 $A_i$ 、 $r_o$ 、 $r_i$

分析为: 其等效电路为: 如图 (6) 所示

(1) 电压放大倍数  $A_u$



因为:  $U_o = -\beta I_b R'_L$   $R'_L = R_c // R_L$

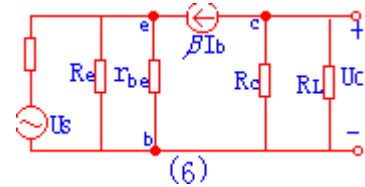
$$U_i = -I_b r_{be}$$

所以:  $A_u = \beta R'_L / r_{be}$

(2) 电流放大倍数  $A_i$

因为:  $I_o = I_c$   $I_i = I_e$

所以:  $A_i = I_c / I_e = \alpha$



(3) 输入电阻  $r_i$

因为:  $r_i = R_e // r'_i$   $r'_i = r_{be} / (1 + \beta)$

所以:  $r_i = R_e // r_{be} / (1 + \beta)$

(4) 输出电阻  $r_o$

当  $U_s = 0$  时,  $I_b = 0$ ,  $\beta I_b = 0$

因此:  $r_o = R_c$

通过上面的学习,我们可以发现,放大电路共发射极时,  $A_i$  和  $A_u$  都比较大,但是输出电压和输入电压的相位相反;共基极时,  $A_i$  比较大,但是  $A_u$  较小,输出电压与输入电压同相,并且具有跟随关系,它可作为输入级,输出级或起隔离作用的中间级;共集电极时,  $A_i$  较小,  $A_u$  较大,输出电压与输入电压同相,多用于宽频带放大等。

#### 第四节: 静态工作点的稳定及其偏置电路

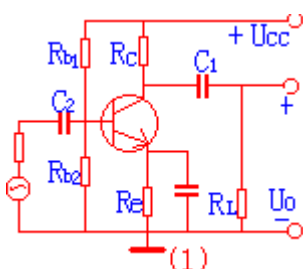
这一节我们主要学习工作点稳定电路的计算。

半导体器件对温度十分敏感,温度的变化会使静态工作点产生变化,如静态工作点选择过高会产生饱和失真等。

我们知道工作点的变化主要集中在  $I_c$  的变化,要使工作点稳定,主要是使  $I_c$  稳定,一般我们是通过反馈法来稳定工作点。反馈法有三种,我们最常用的是电流反馈式偏置电路。

我们通过例题来说明一下

例: 如图(1)所示电路,已知:  $U_{cc} = 24V$ ,  $R_{b1} = 20$  千欧,  $R_{b2} = 60$  千欧,  $R_e = 1.8$  千欧,  $R_c = 3.3$  千欧,  $\beta = 50$ , 求电路的静态工作点。



解：首先作出其微变等效电路图。如图（2）所示：

$$\text{因为： } U_B = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC}$$

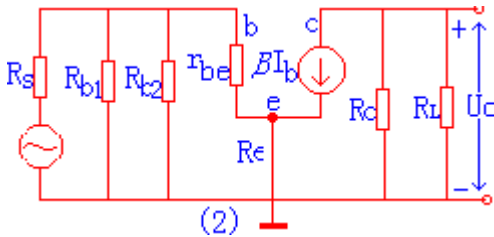
所以：  $U_B = 6V$

所以：  $U_E = U_B - U_{BE} = 6 - 0.7 = 5.3V$

$$I_{EQ} = U_E / R_e = 5.3 / 1.8 = 2.9mA$$

$$I_{BQ} = I_{EQ} / (1 + \beta) = 58\mu A$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_C (R_c + R_e) = 9.21V$$



注：图（1）所示的电路即为电流反馈式偏置电路，

## 第五节：多级放大电路

单级放大电路的放大倍数有时不能满足我们的需要，为此我们需要把若干个基本的放大电路连接起来，组成多级放大电路。多级放大电路之间的连接称为耦合，它的方式有多种。

### 一：多级放大电路的耦合方式

实际中我们常用的耦合方式有三种，即阻容耦合、直接耦合和变压器耦合。

#### 1. 阻容耦合

它的连接方法是：通过电容和电阻把前级输出接至下一级输入。

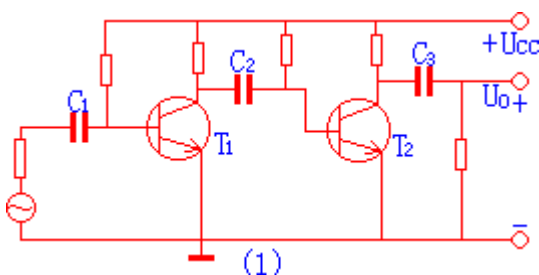
它的特点是：各级静态工作点相对独立，便于调整。

它的缺点是：不能放大变化缓慢（直流）的信号；不便于集成。如图（1）所示为阻容耦合接法。

#### 2. 直接耦合

为了避免电容对缓慢变化信号的影响，我们直接把两级放大电路接在一起，这就是直接耦合法。它的特点是：即能放大交流信号，也能放大直流信号，便于集成，存在零漂现象。

（关于它的问题我们将在以后的章节中讨论）



## 2. 变压器耦合

变压器耦合主要用于功率放大电路，它的优点是可变化电压和实现阻抗变换，工作点相对独立。缺点是体积大，不能实现集成化，频率特性差。

## 二：多级放大电路的指标计算

### 1. 电压放大倍数 $A_u$

多级放大电路的倍数等于各级放大电路倍数的乘积.即:

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3} \cdots A_{un}$$

### 2. 输入电阻和输出电阻

对于多级放大电路来说：输入级的输入电阻就是输入电阻；输出级的输出电阻就是输出电阻。我们在设计放大电路的输入级和输出级时主要是考虑输入电阻和输出电阻的要求

## 第六节：放大电路的频率特性

这一节我们来学习放大电路对不同频率的响应,它就是放大电路的频率特性.

### 一：频率特性简述

(1): 由于放大电路中存在电抗元件  $C$ ，因此它对不同频率呈现的阻抗不同，所以放大电路对不同频率成分的放大倍数和相位移不同。放大倍数与频率的关系称为幅频关系；相位与频率的关系称为相频关系。放大电路工作在中频区时，电压的放大倍数基本不随频率变化，保持一常数。

**低频区：**当放大倍数下降到中频区放大倍数的 0.707 倍时,我们称此时的频率为下限频率  $f_L$ .放大器工作在此区时，所呈现的容抗增大，因此放大倍数下降，同时输出电压与输入电压之间产生附加相移。**高频区：**高频区时的放大倍数也下降。因为放大器工作在高频区时，电路的容抗变小，频率上升时，使加至放大电路输入信号减小，从而使放大倍数下降。

(2): **通频带宽：**上、下限频率之差，既是通频带宽。它是表征放大电路对不同频率的输入信号的响应能力。它定义为： $f_{bw} = f_h - f_l$

(3): **截止频率：**确定原则是：某电容所确定的截止频率，与该电容所在回路的时常数  $\tau$  呈下述关系：

$$f = \frac{1}{2\pi\tau}$$

### 二：多级放大电路的频率特性

#### (1) 多级放大电路通频宽

多级放大电路的频宽窄于单级放大电路的频宽。它的上限频率小于单级放大器的上限频率；下限频率大与单级放大器的下限频率。

#### (2): 上、下限频率的计算

$$\text{上限频率满足关系式: } \frac{1}{f_h} \approx 1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{h1}^2} + \frac{1}{f_{h2}^2} + \cdots + \frac{1}{f_{hn}^2}}$$

$$\text{下限频率满足关系是: } f_l \approx 1.1 \sqrt{f_{l1}^2 + f_{l2}^2 + \cdots + f_{ln}^2}$$

## 第三章 场效应管放大电路

这一节我们来学习另一种放大器件——场效应管。它是通过改变输入电压来控制输出电流的，它是电压控制器件，它不吸收信号源电流，不消耗信号源功率，因此它的输入电阻很高，它还具有很好的温度特性、抗干扰能力强、便于集成等优点。

场效应管是靠一种极性的载流子导电，它又被称为单极性三极管，它分为结型场效应管（JFET）和绝缘栅场效应管（MOS 管）

我们在学习时把这一章的内容分为三节，它们是：

- 场效应管的类型
- 场效应管的主要参数和特点
- 总结

### 第一节：场效应管的类型

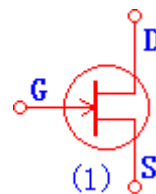
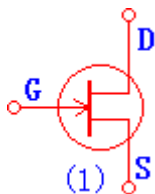
这一节我们要了解场效应管的分类，各种场效应管的工作特点及根据特性曲线能判断管子的类型。场效应管分为结型场效应管（JFET）和绝缘栅场效应管（MOS 管）

#### 一：结型场效应管

##### 1. 结型场效应管的分类

结型场效应管有两种结构形式。它们是 N 沟道结型场效应管（符号图为（1））和 P 沟道结型场效应管（符号图为（2））

2. 从图中我们可以看到，结型场效应管也具有三个电极，它们是：G——栅极；D——漏极；S——源极。电路符号中栅极的箭头方向可理解为两个 PN 结的正向导电方向。



##### 2. 结型场效应管的工作原理(以 N 沟道结型场效应管为例)

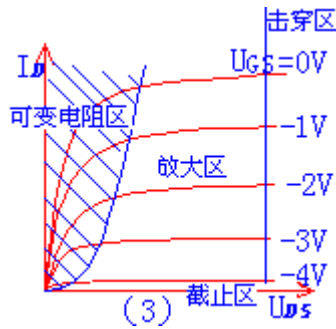
在 D、S 间加上电压  $U_{DS}$ ，则源极和漏极之间形成电流  $I_D$ ，我们通过改变栅极和源极的反向电压  $U_{GS}$ ，就可以改变两个 PN 结阻挡层的（耗尽层）的宽度，这样就改变了沟道电阻，因此就改变了漏极电流  $I_D$ 。

##### 3. 结型场效应管的特性曲线(以 N 沟道结型场效应管为例)

输出特性曲线：（如图（3）所示）

根据工作特性我们把它分为四个区域，即：可变电阻区、放大区、击穿区、截止区。

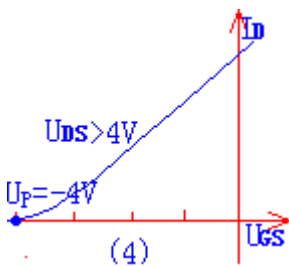
对此不作很深的要求，只要求我们看到输出特性曲线能判断是什么类型的管子即可



转移特性曲线:

$$I_D = f(U_{GS}) | U_{DS} = \text{常数}$$

我们根据这个特性关系可得出它的特性曲线如图(4)所示。它描述了栅、源之间电压对漏极电流的控制作用。从图中我们可以看出当  $U_{GS} = U_p$  时  $I_D = 0$ 。我们称  $U_p$  为夹断电压。



注: 转移特性和输出特性同是反映场效应管工作时,  $U_{GS}$ 、 $U_{DS}$ 、 $I_D$  之间的关系, 它们之间是可以互相转换的。

## 二: 绝缘栅场效应管(MOS 管)

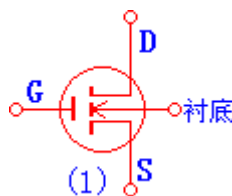
### 1. 绝缘栅场效应管的分类

绝缘栅场效应管也有两种结构形式, 它们是 N 沟道型和 P 沟道型。无论是什麼沟道, 它们又分为增强型和耗尽型两种。

### 2. 绝缘栅型场效应管的工作原理(以 N 沟道增强型 MOS 场效应管)

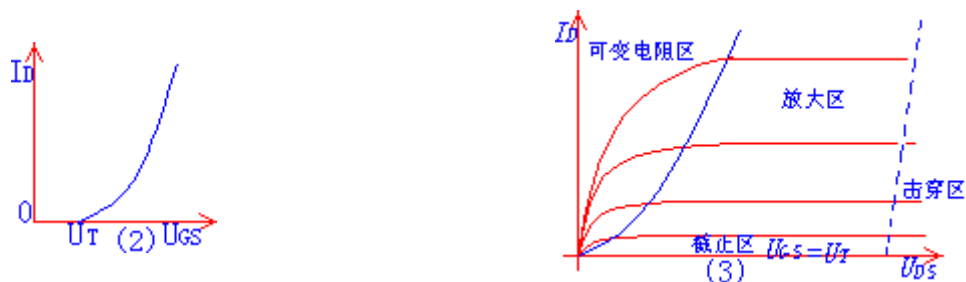
我们首先来看 N 沟道增强型 MOS 场效应管的符号图: 如图(1)所示

它是利用  $U_{GS}$  来控制“感应电荷”的多少, 以改变由这些“感应电荷”形成的导电沟道的状况, 从而达到控制漏极电流的目的。



### 3. 绝缘栅型场效应管的特性曲线(以 N 沟道增强型 MOS 场效应管)

它的转移特性曲线如图(2)所示;



它的输出特性曲线如图(3)所示，它也分为4个区：可变电阻区、放大区、截止区和击穿区。  
注：对此我们也是只要求看到输出特性曲线和转移曲线能判断出是什麽类型的管子，即可。

## 第二节：场效应管的主要参数和特点

### 一：场效应管的主要参数

#### (1) 直流参数

饱和漏极电流  $I_{DSS}$  它可定义为：当栅、源极之间的电压等于零，而漏、源极之间的电压大于夹断电压时，对应的漏极电流。

夹断电压  $U_p$  它可定义为：当  $U_{DS}$  一定时，使  $I_D$  减小到一个微小的电流时所需的  $U_{GS}$

开启电压  $U_T$  它可定义为：当  $U_{DS}$  一定时，使  $I_D$  到达某一个数值时所需的  $U_{GS}$

#### (2) 交流参数

低频跨导  $g_m$  它是描述栅、源电压对漏极电流的控制作用。

极间电容 场效应管三个电极之间的电容，它的值越小表示管子的性能越好。

#### (3) 极限参数

漏、源击穿电压当漏极电流急剧上升时，产生雪崩击穿时的  $U_{DS}$ 。

栅极击穿电压结型场效应管正常工作时，栅、源极之间的PN结处于反向偏置状态，若电流过高，则产生击穿现象。

### 二：场效应管的特点

场效应管具有放大作用，可以组成放大电路，它与双极性三极管相比具有以下特点：

- (1) 场效应管是电压控制器件，它通过  $U_{GS}$  来控制  $I_D$ ；
- (2) 场效应管的输入端电流极小，因此它的输入电阻很高；
- (3) 它是利用多数载流子导电，因此它的温度稳定性较好；
- (4) 它组成的放大电路的电压放大系数要小于三极管组成放大电路的电压放大系数；
- (5) 场效应管的抗辐射能力强。

## 第三节：总结

下面我们通过表格把各种场效应管的符号和特性曲线表示出来：

种类	符号	转移特性	输出特性
----	----	------	------



结型 N 沟道	耗尽型			
结型 P 沟道	耗尽型			
绝缘 栅型 N 沟道	增强型			
	耗尽型			
绝缘 栅型 P 沟道	增强型			
	耗尽型			

我们这一节要掌握的问题是：

- (1) 场效应管与三极管相比所具有的特点；
- (2) 根据输出特性或转移特性能判断出是什么类型的管子（这一点是我们学习的重点）
- (3) 结型和绝缘栅型场效应管的工作特点和原理（只要求我们了解）。

## 第四章 负反馈放大电路

在实际中我们需要的放大器是多种多样的，前面所学的基本放大电路是不能满足我们的要求的。为此我们在放大电路中十分广泛的应用负反馈的方法来改善放大电路的性能。这一节我们就来学习关于负反馈的一些知识，它是我们这门课程的重点，我们要掌握好！

- 负反馈
- 负反馈对放大电路性能的影响
- 负反馈放大电路的计算
- 总结

### 第一节：负反馈

这一节我们来了解反馈的一些基本概念。

#### 一：反馈的定义

反馈：可描述为将放大电路的输出量（电压或电流）的一部分或全部，通过一定的方式送回放大电路的输入端。我们有时把引入反馈的放大电路称为闭环放大器，没有引入的称为开环放大器。

#### 二：反馈的分类和判断

##### 1. 按反馈的极性分

它可分为负反馈和正反馈。反馈输入信号能使原来的输入信号减小即为负反馈，反之则为正反馈。

问题：怎么判断电路是正反馈还是负反馈呢？

答：首先我们来说一下判断的思路，就是通过比较反馈前后的输入量的改变情况，若反馈后的净输入量减小则为负反馈，反之则为正反馈。（净输入量是反馈后的输入量）

我们判断的方法是：瞬时极性法。先将反馈网络与放大电路的输入段断开，然后设定输入信号有一个正极性的变化，再看反馈回来的量是正极性的还是负极性的，若是负极性，则表示反馈量是削弱输入信号，因此是负反馈。反之则为正反馈。

负反馈对放大器性能才有改善，正反馈使放大器的性能变坏，因此正、负反馈的判断我们要掌握好！

##### 2. 按交直流性质分

它可分为直流反馈和交流反馈。

直流反馈常用于稳定直流工作点，交流反馈主要用于放大电路性能的改善。

##### 3. 按输出端取样对象分

它分为电压反馈和电流反馈。

#### 4. 按输入端的连接方式分

它可分为串联反馈和并联反馈。

它们对信号源的内阻  $R_s$  的要求是不同的。串联反馈要求  $R_s$  越小越好，并联则要求  $R_s$  越大越好！

在放大电路中主要是用负反馈，因此我们这一章只学习负反馈。

按上面的分类，负反馈放大电路可又四种组态：串联电压反馈；串联电流反馈；并联电压反馈；并联电流反馈。

#### 反馈的一般表达式

如右图所示的反馈电路的结构框图，基本放大电路的放大倍数为：
$$A = \frac{X_o}{X_i'}$$

反馈网络的反馈系数为：
$$F = \frac{X_f}{X_o}$$



由于： $X_i' = X_i - X_f$  所以： $X_o = A(X_i - X_f) = A(X_i - FX_o) = AX_i - AFX_o$

所以反馈放大电路的放大系数（又称开环增益）为：
$$A_f = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AF}$$

这个式子反映了反馈放大电路的基本关系，也是分析反馈问题的基本出发点。其中  $(1+AF)$  是描述反馈强弱的物理量，它又被称为反馈深度，它是反馈电路定量分析的基础。

#### 一、串联电压负反馈

串联电压负反馈是稳定输出电压  $U_o$ 。当  $U_i$  为某一固定数值时，由于某些原因使  $U_o$  减小，则  $U_f$  也随之减小，这样就使净输入电压增大，因此输出电压也增大，故稳定了输出电压。

因输出的是电压，反馈回来是以电压的形式加在输入端的，因此基本电路的放大倍数为：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i'}$$

反馈系数为：
$$A_f = \frac{A_u}{1 + F_u A_u}$$

闭环放大倍数为：
$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + F_u A_u}$$

#### 二、串联电流负反馈

串联电流负反馈，是用来稳定输出电流的。

它的放大倍数关系如下：由于输出的是电流，反馈回来的是以电压的形式加在输入端的，所以它的互导放大倍数为：
$$A_{if} = \frac{A_f}{1 + F_f A_f}$$

### 三、并联电压负反馈

并联电压负反馈，输入用电压，输出用电压。因此它为互阻放大系数：
$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + F_v A_v}$$
从定义我们可以看出  $A_{vf} = \frac{U_o}{I_i}$ ，即： $U_o = A_{vf} I_i$  是输入电流控制的电压源，它稳定输出电压。

### 四、并联电流负反馈

并联电流负反馈的输入、输出均用电压，因此是电压放大倍数：
$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + F_v A_v}$$
由定义知  $A_{vf} = \frac{I_o}{I_i}$ ，即： $I_o = A_{vf} I_i$ 。它是输入电压控制的电流源。它稳定输出电流。

## 第二节：负反馈对放大电路性能的影响

负反馈都是对放大电路的那些性能产生影响呢？我们这一节就来解决这个问题！

### 一：对放大倍数的影响

(1) 负反馈使放大倍数下降

由放大倍数的一般表达式：
$$A_f = \frac{A}{1 + FA}$$
 我们可以看出引入负反馈后，放大倍数下降了

$(1+FA)$ 倍。

(2) 负反馈提高放大倍数的稳定性

我们用相对变化量来表示（对上式求导）：
$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+FA} \frac{dA}{A}$$

从上式我们可以看出放大倍数的稳定性也提高了  $(1+FA)$  倍。

例 1：某负反馈放大电路，其  $A=10^4$ ，反馈系数  $F=0.01$ 。如由于某些原因，使  $A$  变化了  $\pm 10\%$ ，求  $A_f$  的相对变化量为多少？

解：由上式得

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+10^4 \times 0.01} \times (\pm 10\%) \approx \pm 0.1\%$$

即  $A$  变化  $\pm 10\%$  的情况下， $A_f$  只变化了  $\pm 0.1\%$ 。

### 二：负反馈对输入电阻的影响

它对输入电阻的影响，只取决于反馈电路在输入端的连接方式，即：取决于是串联反馈还是并联反馈

(1) 串联反馈使输入电阻提高 即： $r_{if} = (1+FA) r_i$

(2) 并联反馈使输入电阻下降 即： $r_{if} = r_i / (1+FA)$

### 三：负反馈对输出电阻的影响

它对输出电阻的影响，只取决于反馈电路在输出端的连接方式，即：取决于是电压反馈还是电流反馈

(1) 电压反馈使输出电阻降低 即： $r_{of}=r_o/(1+FA)$

(2) 电流反馈使输出电阻提高 即： $r_{of}=(1+FA)r_o$

#### 四：负反馈对放大电路非线性失真的影响

负反馈可以使放大电路的非线性失真减小，它还可以抑制放大电路自身产生的噪声。

注：负反馈只能减小本级放大器自身产生的非线性失真和自身的噪声，对输入信号存在的非线性失真和噪声，负反馈是不能改变的。

#### 五：负反馈对频带的影响

引入负反馈后放大电路上、下限频率改变的表达式为：

$$\text{上限为： } f_H = (1+FA_m)f_k$$

$$\text{下限为： } f_L = (1+FA_m)f_L$$

频带的变化表达式为： $f_{bw} = f_H - f_L \approx (1+FA_m)f_{bw}$

即：引入负反馈后，上限频率提高 $(1+FA_m)$ 倍，下限频率下降 $(1+FA_m)$ 倍；频带展宽 $(1+FA_m)$ 倍。

## 第三章 集成运算放大器

集成运算放大器（简称运放）是一种高电压放大倍数的直接耦合放大器。它工作在放大区时，输入和输出呈线性关系，所以它又被称为线性集成电路。

这一章我们来学习集成放大电路的组成原理，重点来学习差动放大电路。在学习时我们把它的内容分为三节，它们是：

- 差动放大电路
- 集成运算放大器
- 总结

### 第一节：差动放大电路

我们先来学习一个概念-----零点漂移

#### 一：零点漂移

零点漂移可描述为：输入电压为零，输出电压偏离零值的变化。它又被简称为：零漂

问题：零点漂移是怎样形成的？

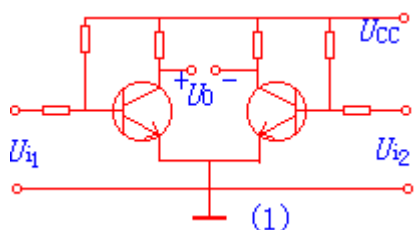
答：运算放大器均是采用直接耦合的方式，我们知道直接耦合式放大电路的各级的 Q 点是相互影响的，由于各级的放大作用，第一级的微弱变化，会使输出级产生很大的变化。当输入短路时（由于一些原因使输入级的 Q 点发生微弱变化象：温度），输出将随时间缓慢变化，这样就形成了零点漂移。

产生零漂的原因是：晶体三极管的参数受温度的影响。解决零漂最有效的措施是：采用差动电路。

## 二：差动放大电路

### 1、差动放大电路的基本形式 如图（1）所示

基本形式对电路的要求是：两个电路的参数完全对称两个管子的温度特性也完全对称。

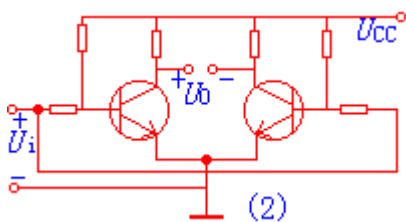


它的工作原理是：当输入信号  $U_i=0$  时，则两管的电流相等，两管的集电极电位也相等，所以输出电压  $U_o=U_{c1}-U_{c2}=0$ 。温度上升时，两管电流均增加，则集电极电位均下降，由于它们处于同一温度环境，因此两管的电流和电压变化量均相等，其输出电压仍然为零。

它的放大作用（输入信号有两种类型）

#### （1）共模信号及共模电压的放大倍数 $A_{uc}$

共模信号---在差动放大管 T1 和 T2 的基极接入幅度相等、极性相同的信号。如图（2）所示



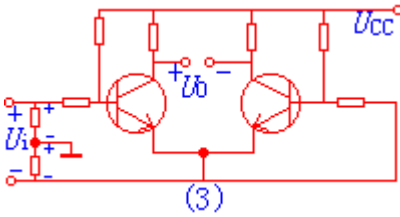
共模信号的作用，对两管的作用是同向的，将引起两管电流同量的增加，集电极电位也同

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = 0$$

量减小，因此两管集电极输出共模电压  $U_{oc}$  为零。因此于是差动电路对称时，对共模信号的抑制能力强

(2) 差模信号及差模电压放大倍数  $A_{ud}$ 

差模信号---在差动放大管 T1 和 T2 的基极分别加入幅度相等而极性相反的信号。如图 (3) 所示



差模信号的作用，由于信号的极性相反，因此 T1 管集电极电压下降，T2 管的集电极电压上升，且二者的变化量的绝对值相等，因此： $U_{od} = U_{c1} - U_{c2} = 2U_{c1}$  (或  $2U_{c2}$ )

此时的两管基极的信号为： $U_{id} = U_{i1} - U_{i2} = 2U_{i1}$

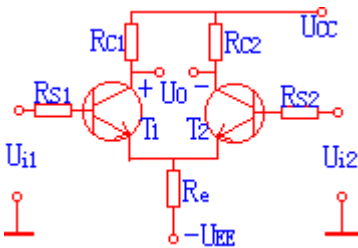
所以： $A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{2U_{c1}}{2U_{i1}} = \frac{U_{c1}}{U_{i1}} = A_{u1} \approx -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}}$ ，由此我们可以看出差动电路的差模电压放大倍数等于单管电压的放大倍数。

输入端信号之差为 0 时，输出为 0；输入端信号之差不为 0 时，就有输出。这就被称为差动放大电路。

## 第二节：长尾式差动放大电路

它又被称为射极耦合差动放大电路，如右图所示：图中的两个管子通过射极电阻  $R_e$  和  $U_{ee}$  耦合。

下面我们来学习它的一些指标



### (1) 静态工作点

静态时，输入短路，由于流过电阻  $R_e$  的电流为  $I_{E1}$  和  $I_{E2}$  之和，且电路对称， $I_{E1} = I_{E2}$ ，

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{2R_e + \frac{R_s}{1+\beta}} \approx \frac{U_{EE} - U_{BE}}{2R_e}$$

因此:

### (2) 对共模信号的抑制作用

在这里我们只学习共模信号对长尾电路中的  $R_e$  的作用。由于是同向变化的, 因此流过  $R_e$  的共模信号电流是  $I_{e1} + I_{e2} = 2I_e$ 。对每一管来说, 再视为在射极接入电阻为  $2R_e$ 。

它的共模放大倍数为:  $A_{uc} = \frac{R_c}{R_s + r_{be} + (1+\beta)2R_e}$  (用第二章学的方法求得)

由此式我们可以看出  $R_e$  的接入, 使每管的共模放大倍数下降了很多 (对零漂具有很强的抑制作用)

### (3) 对差模信号的放大作用

差模信号引起两管电流的反向变化 (一管电流上升, 一管电流下降), 流过射极电阻  $R_e$  的差模电流为  $I_{e1} - I_{e2}$ , 由于电路对称, 所以流过  $R_e$  的差模电流为零,  $R_e$  上的差模信号电压也为零, 因此射极视为地电位, 此处“地”称为“虚地”。因此差模信号时,  $R_e$  不产生影响。

由于  $R_e$  对差模信号不产生影响, 故双端输出的差模放大倍数仍为单管放大倍数:  $A_{ud} = \frac{R_c}{R_s + r_{be}}$

### (4) 共模抑制比 (CMRR)

$$CMRR = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

我们一般用共模抑制比来衡量差动放大电路性能的优劣。CMRR 定义如下:

它的值越大, 表明电路对共模信号的抑制能力越好。

$$CMR = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = 20 \lg |A_{ud}| - 20 \lg |A_{uc}|$$

有时还用对数的形式表示共模抑制比, 即: , 其中

$20 \lg |A_{ud}|$  为差模增益。CMR 的单位为: 分贝 (dB)

### (5) 一般输入信号情况

如果差动电路的输入信号, 即不是共模也不是差模信号时: 我们要把输入信号分解为一对共模信号和一对差模信号, 它们共同作用在差动电路的输入端。

例 1: 如右图所示电路, 已知差模增益为 48dB, 共模抑制比为 67dB,  $U_{i1} = 5V$ ,  $U_{i2} = 5.01V$ ,

试求输出电压  $U_o$

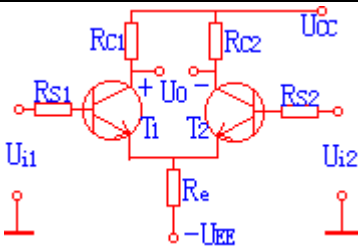
解:  $\because 20 \lg |A_{ud}| = 48 \text{dB}$ ,  $\therefore A_{ud} \approx -251$ ,

又  $\because CMR = 67 \text{dB}$

$\therefore CMRR \approx 2239$

$\therefore A_{uc} = A_{ud} / CMRR \approx 0.11$





则输出电压为：
$$U_o = A_{ud}U_{i2} + A_{uc}U_{i1} = -251 \times (5 - 5.01) + 0.11 \times \left(\frac{5 + 5.01}{2}\right) = 2.51 + 0.55 = 3.06V$$

## 第六章 集成运算放大器的应用

集成运放最早应用于信号的运算，所以它又被称为运算放大器。随着集成运放技术的发展，目前集成运放的应用几乎渗透到电子技术的各个领域，它成为组成电子系统的基本功能单元。

这一章是这门课程的重点内容之一，在学习是我们把这一章的课程分为：

- 集成运放的应用基础
- 运算电路
- 有源滤波电路和电压比较器
- 总结

### 第一节：集成运放的应用基础

这一节我们主要学习理想运放的线性运用和非线性应用的条件及其分析方法。

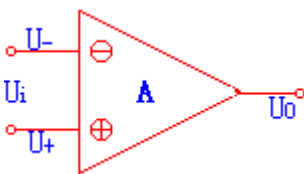
#### 一：低频等效电路

在电路中集成运放作为一个完整的独立的器件来对待。于是在分析、计算时我们用等效电路来代替集成运放。

由于集成运放主要用于频率不高的场合，因此我们只学习低频率时的等效电路。

右图所示为集成运放的符号，它有两个输入端和一个输出端。

其中：标有⊕的为同相输入端(输出电压的相位与该输入电压的相位相同) 标有⊖  
的为反相输入端(输出电压的相位与该输入电压的相位相反)



#### 二：理想集成运放

一般我们是把集成运放视为理想的（将集成运放的各项技术指标理想化）

开环电压放大倍数: $A_{od} = \infty$	输入电阻: $r_{id} = \infty$	输入偏置电流: $I_{B1} = I_{B2} = 0$
共模抑制比: $CMRR = \infty$	输出电阻: $r_{od} = 0$	-3dB 带宽: $f_H = \infty$
无干扰无噪声	失调电压 $U_{IO}$ 、失调电流 $I_{IO}$ 及它们的温漂均为零	

### 三: 集成运放工作在线性区的特性

当集成运放工作在线性放大区时的条件是: (1)  $U_- \approx U_+$  (2)  $I_- = I_+ = 0$

注: (1)即:同相输入端与反相输入端的电位相等,但不是短路。我们把满足这个条件称为“虚短”

(2)即:理想运放的输入电阻为 $\infty$ ,因此集成运放输入端不取电流。

我们在计算电路时,只要是线性应用,均可以应用以上的两个结论,因此我们要掌握好!

当集成运放工作在线性区时,它的输入、输出的关系式为:  $U_o = A_{od}(U_- - U_+)$

### 四: 集成运放工作在线性区

当集成运放工作在线性区时的条件是: 集成运放在非线性工作区内一般是开环运用或加正反馈。它的输入输出关系是:  $U_o \neq A_{od}(U_- - U_+)$

它的输出电压有两种形态: (1) 当  $U_- > U_+$  时,  $U_o = U_{oL}$  (2) 当  $U_- < U_+$  时,  $U_o = U_{oH}$

它的输入电流仍为零 (因为  $r_{id} = \infty$ ) 即:  $I_- = I_+ = 0$

集成运放工作在不同区域时,近似条件不同,我们在分析集成运放时,应先判断它工作在什麼区域,然后再用上述公式对集成运放进行分析、计算。

## 第二节: 运算电路

这一节我们学习对信号进行比例、加、减、乘、除等运算的电路。此时集成运放工作在线性区。

### 一: 比例运算电路

定义: 将输入信号按比例放大的电路,称为比例运算电路。

分类: 反向比例电路、同相比例电路、差动比例电路。(按输入信号加入不同的输入端分)

比例放大电路是集成运算放大电路的三种主要放大形式

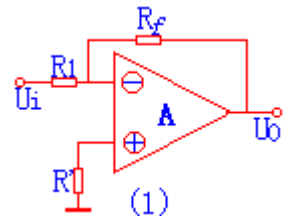
#### (1) 反向比例电路

输入信号加入反相输入端, 电路如图(1)所示:

输出特性: 因为:  $U_- = U_+ = 0, I_- = I_+ = 0$

所以: 
$$I_1 = \frac{U_i - U_-}{R_1} = \frac{U_i}{R_1} = I_f$$

$$U_o = -I_f R_f = -\frac{R_f}{R_1} U_i$$



从上式我们可以看出:  $U_o$  与  $U_i$  是比例关系, 改变比例系数  $\frac{R_f}{R_1}$ , 即可改变  $U_o$  的数值。负号表示输出电压与输入电压极性相反。

反向比例电路的特点:

(1) 反向比例电路由于存在“虚地”, 因此它的共模输入电压为零. 即: 它对集成运放的共模抑制比要求低

(2) 输入电阻低:  $r_i = R_1$ . 因此对输入信号的负载能力有一定的要求.

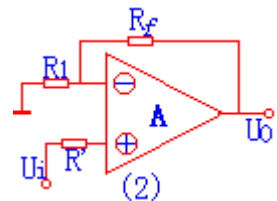
(2) 同相比例电路

输入信号加入同相输入端, 电路如图(2)所示:

输出特性: 因为:  $U_- = U_+ = U_i$  (虚短但不是虚地);  $I_- = I_+ = 0$ ;  $U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_o$

所以: 
$$U_o = \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1}\right) U_- = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_i$$

改变  $R_f/R_1$  即可改变  $U_o$  的值, 输入、输出电压的极性相同



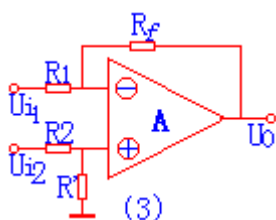
同相比例电路的特点:

(1) 输入电阻高; (2) 由于  $U_- = U_+ = U_i$  (电路的共模输入信号高), 因此集成运放的共模抑制比要求高

(3) 差动比例电路

输入信号分别加之反相输入端和同相输入端, 电路图如图(3)所示:

它的输出电压为: 
$$U_o = \frac{R_f}{R_1} (U_{i2} - U_{i1})$$

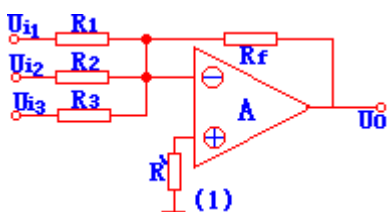


由此我们可以看出它实际完成的是：对输入两信号的差运算。

## 二：和、差电路

### (1) 反相求和电路

它的电路图如图(1)所示：（输入端的个数可根据需要进行调整）其中电阻  $R'$  为： $R' = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_f$



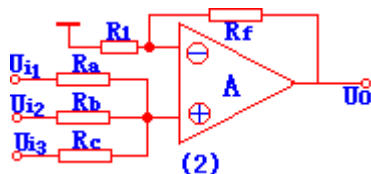
$$U_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} U_{11} + \frac{R_f}{R_2} U_{12} + \frac{R_f}{R_3} U_{13}\right)$$

它的输出电压与输入电压的关系为：

它可以模拟方程： $Y = -(a_0 X_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2)$ 。它的特点与反比例电路相同。它可十分方便的某一电路的输入电阻，来改变电路的比例关系，而不影响其它路的比例关系。

### (2) 同相求和电路

它的电路图如图(2)所示：（输入端的个数可根据需要进行调整）



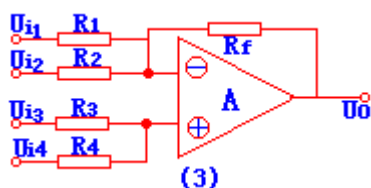
$$U_o = R_f \left( \frac{U_{11}}{R_a} + \frac{U_{12}}{R_b} + \frac{U_{13}}{R_c} \right)$$

它的输出电压与输入电压的关系为： $U_o = R_f \left( \frac{U_{11}}{R_a} + \frac{U_{12}}{R_b} + \frac{U_{13}}{R_c} \right)$ 。它的调节不如反相求和电路，而且它的共模输入信号大，因此它的应用不很广泛。

### (3) 和差电路

它的电路图如图(3)所示:

此电路的功能是对  $U_{i1}$ 、 $U_{i2}$  进行反相求和, 对  $U_{i3}$ 、 $U_{i4}$  进行同相求和, 然后进行的叠加即得和差结果。



$$U_o = R_f \left( \frac{U_{i3}}{R_3} + \frac{U_{i4}}{R_4} - \frac{U_{i1}}{R_1} - \frac{U_{i2}}{R_2} \right)$$

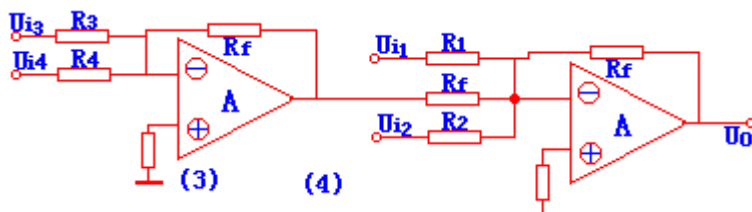
它的输入输出电压的关系是:

由于该电路用一只集成运放, 它的电阻计算和电路调整均不方便, 因此我们常用二级集成运放组成和差电路。它的电路图如图(4)所示

它的输入输出电压的关系是:

$$U_o = R_f \left( \frac{U_{i3}}{R_3} + \frac{U_{i4}}{R_4} - \frac{U_{i1}}{R_1} - \frac{U_{i2}}{R_2} \right)$$

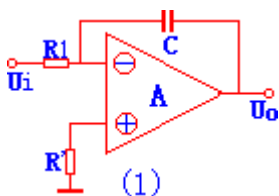
它的后级对前级没有影响 (采用的是理想的集成运放), 它的计算十分方便。



### 三: 积分电路和微分电路

#### (1) 积分电路

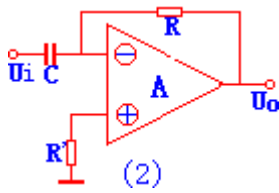
它可实现积分运算及产生三角波形等。积分运算是: 输出电压与输入电压呈积分关系。它的电路图如图(1)所示: 它是利用电容的充放电来实现积分运算



它的输入、输出电压的关系为:  $u_o = \frac{-1}{RC} \int_{t_0}^t u_i dt + u_c|_{t=t_0}$  其中:  $u_c|_{t=t_0}$  表示电容两端的初始电压值。如果电路输入的电压波形是方形, 则产生三角波形输出。

(2) 微分电路

微分是积分的逆运算，它的输出电压与输入电压呈微分关系。电路图如图（2）所示：



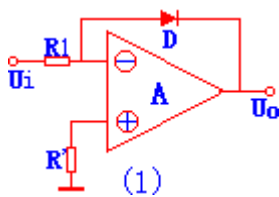
它的输入、输出电压的关系为：
$$u_o = -Ri_f = -Ri_c = -RC \frac{du_i}{dt}$$

四：对数和指数运算电路

(1) 对数运算电路

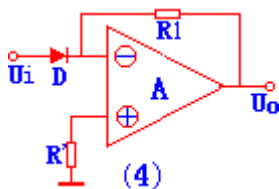
对数运算电路就是是输出电压与输入电压呈对数函数。我们把反比例电路中  $R_f$  用二极管或三级管代替级组成了对数运算电路。电路图如图（3）所示：

它的输入、输出电压的关系为：
$$u_o \approx -U_T \ln \frac{u_i}{R I_s}$$
 （也可以用三级管代替二极管）



(2) 指数运算电路

指数运算电路是对数运算的逆运算, 将指数运算电路的二极管(三级管)与电阻 R 对换即可。电路图如(4)所示



它的输入、输出电压的关系为：
$$u_o = -I_s R e^{\frac{u_i}{U_T}}$$

利用对数和指数运算以及比例，和差运算电路，可组成乘法或除法运算电路和其它非线性运算电路

第三节：有源滤波电路和电压比较器

这一节我们来学习关于滤波电路和电压比较器的一些知识

## 一：滤波电路的基础知识

滤波电路的作用：允许规定范围内的信号通过；而使规定范围之外的信号不能通过。

滤波电路的分类：（按工作频率的不同）

低通滤波器：允许低频率的信号通过，将高频信号衰减。

高通滤波器：允许高频信号通过，将低频信号衰减。

带通滤波器：允许一定频带范围内的信号通过，将此频带外的信号衰减。

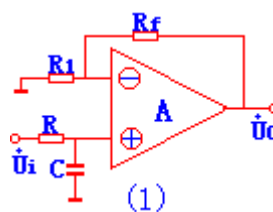
带阻滤波器：阻止某一频带范围内的信号通过，而允许此频带以外的信号衰减。

我们在电路分析课程中已学习了，利用电阻、电容等无源器件构成的滤波电路，但它有很大的缺陷如：电路增益小；驱动负载能力差等。为此我们要学习有源滤波电路。

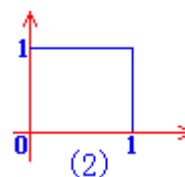
## 二：有源滤波电路

### (1) 低通滤波电路

它的电路图如图(1)所示：(我们以无源滤波网络 RC 接至集成运放的同相输入端为例)



它的幅频特性如图(2)所示：



它的传输函数为：

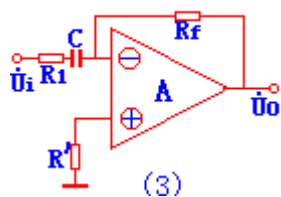
$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{A_{up}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

其中： $A_{up}$  为通带电压放大被数， $A_{up} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$ ；通带截止角频率  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

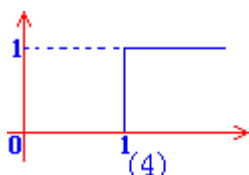
对于低有源滤波电路，我们可以通过改变电阻  $R_f$  和  $R_1$  的阻值来调节通带电压的放大被数。

### (2) 高通滤波电路

它的电路图如图(3)所示：(我们以无源滤波网络接至集成运放的反相输入端为例)



同样我们可以得到它的幅频特性如图(4)所示:



它的传输函数为:

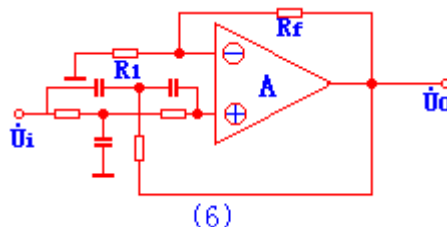
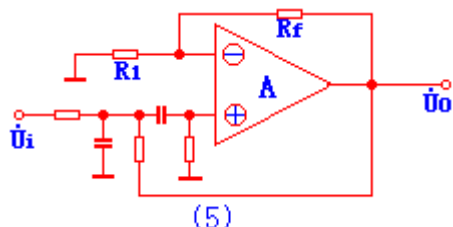
$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_f}{R_1} \frac{1}{1-j\frac{\omega_c}{\omega}} = \frac{A_{wp}}{1-j\frac{\omega_c}{\omega}}$$

其中:  $A_{wp} = -\frac{R_f}{R_1}$  (通带电压放大被数);  $\omega_c = \frac{1}{R_1 C}$  (通带截止角频率)

### (3) 带通滤波电路和带阻滤波电路

将低通滤波电路和高通滤波电路进行不同组合, 即可的获得带通滤波电路和带阻滤波电路,

它们的电路图分别为: 如图(5)所示带通滤波电路; 如图(6)所示带阻滤波电路:



这一页我们来学习电压比较器的一些知识

### 一: 电压比较器的基础知识

电压比较器的功能: 比较两个电压的大小(用输出电压的高或低电平, 表示两个输入电压的



大小关系)

电压比较器的作用：它可用作模拟电路和数字电路的接口，还可以用作波形产生和变换电路等。

注：电压比较器中的集成运放通常工作在非线性区。及满足如下关系：

$U > U_+$ 时 $U_o = U_{oL}$	$U < U_+$ 时 $U_o = U_{oH}$
----------------------------	----------------------------

## 二：简单电压比较器

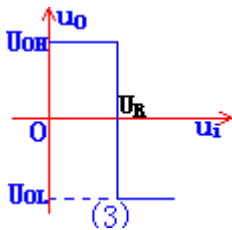
我们把参考电压和输入信号分别接至集成运放的同相和反相输入端，就组成了简单的电压比较器。如图（1）、（2）所示：



下面我们对它们进行分析一下（只对图（1）所示的电路进行分析）

它的传输特性如图（3）所示：

它表明：输入电压从低逐渐升高经过  $U_R$  时， $u_o$  将从高电平变为低电平。相反，当输入电压从高逐渐到低时， $u_o$  将从低电平变为高电平。



定义：阈值电压：我们将比较器的输出电压从一个电平跳变到另一个电平时对应的输入电压的值。它还被称为门限电压。简称为：阈值。用符号  $U_{th}$  表示。

利用简单电压比较器可将正弦波变为同频率的方波或矩形波。

例：电路如（1）所示，输入电压为正弦波如图（4）所示，试画出输出波形

(4)

(5)

解：输出波形与  $U_R$  有关，输出波形如图（5）所示

简单的电压比较器结构简单，灵敏度高，但是抗干能力差，因此我们就要对它进行改进。改进后的电压比较器有：滞回比较器和窗口比较器。在此对它们不作要求。

我们前面学习的比较器都是用集成运放构成的，它存在着一定的缺点。我们一般用集成电压比较器来代替它。集成电压比较器的固有特点是：

- 可直接驱动 TTL 等数字集成电路器件；
- 它的响应速度比同等价格集成运放构成比较器快；

为提高速度，集成电压比较器内部电路的输入级工作电流较大。

#### 第四节：总结

这一章是本课程的重点内容，我们在学习是要注意理想运放电路的分析计算方法。这一章我们要重点掌握的内容有：

- (1) 理想运放的线性运用和非线性应用的条件及其分析方法；
- (2) 反相、同相和差动放大电路及其性能特点；
- (3) 和、差电路的类型和运算；
- (4) 反相积分电路及其输出电压的计算；
- (5) 一阶 RC 低通、高通滤波电路的组成特点以及传输函数、幅频特性和截止频率的计算，带通、带阻滤波器的实现方法。
- (6) 简单电压比较器及其传输特性的画法。在已知输入波形下，如何画出比较器的输出波形。

## 第七章 波形发生与变换电路

波形发生电路包含正弦振荡电路和非正弦振荡电路，它们不需要输入信号便能产生各种周期性的波形；波形变换电路是将输入信号的波形变换为另一种形状的波形。

这一章主要学习运用分立元件和运算放大器组成的正弦波和非正弦波产生电路。

在学习时我们把这一章的内容分为：

- 非正弦波产生电路
- 正弦波产生电路
- 总结

#### 第一节：非正弦波产生电路

这一节我们来学习利用电压比较器和积分电路组成的非正弦波产生电路。

在学习之前我们先来学习一下有关非正弦波形的一些知识。

矩形波、锯齿波、三角波等非正弦波，实质是脉冲波形。我们一般用惰性元件电容 C 和电感 L 的充放电来实现。

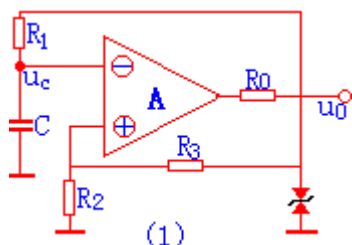
##### 一：非正弦波产生电路

它是由积分电路和滞回比较器电路组成的。积分电路的作用是产生暂态过程。滞回比较器起开关作用。即：通过开关的不断的闭合，来破坏稳态，产生暂态过程。

## (1) 矩形波产生电路

用滞回比较器作开关，RC 组成积分电路，即可组成矩形波产生电路。电路图如 (1) 所示：  
工作原理：

电路是通过电阻  $R_0$  和稳压管对输出限幅，如它们的稳压值相等，则电路输出电压正、负幅度对称。在利用数据比较器和积分电路的特性即可得到矩形波。



振荡周期计算：

它等于正半周期和负半周期的和。我们可通过电容充放电的三要素和转换值求得。

$$T_1 = \tau_{RC} \ln \frac{u_c(\infty) - u_c(0^+)}{u_c(\infty) - u_c(T_1)}$$

$$\text{其中: } \tau_{RC} = RC; \quad u_c(\infty) = -U_Z; \quad u_c(0^+) = \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_Z; \quad u_c(T_1) = -\frac{R_2}{R_2 + R_3} U_Z$$

$$T = T_1 + T_2 = 2T_1 = 2RC \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_3}\right)$$

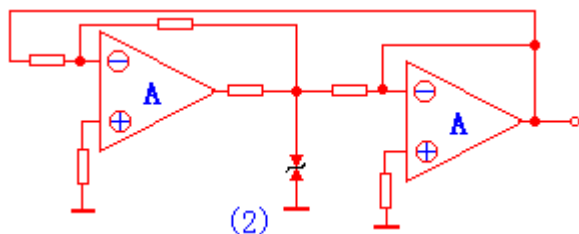
因此振荡周期：

从中我们可以看到：改变  $R$ 、 $C$  或  $R_2$ 、 $R_3$  均可改变电路的振荡周期。

我们以上所述的是建立在  $U_{OH} = |U_{OL}|$  的基础上。若  $U_{OH} \neq |U_{OL}|$ ，则产生  $T_1 \neq T_2$  的矩形波。

## (2) 三角波产生电路

用集成运放的积分电路代替矩形波产生电路的 RC 电路，（略加改进）即可形成。  
它的电路图如图 (2) 所示：



它的前级集成运放组成滞回比较电路，后级组成积分电路。它可同时产生方波（前级集成运放产生）和三角波（后级集成运放产生）。

三角波的电容充放电时间相等，若电容的充放电时间不等而且相差很大，便产生锯齿波。

## 第二节：正弦波产生电路

这一节我们来学习有关正弦波产生电路的知识。正弦波产生电路又称为正弦波振荡器。

### 一：产生正弦振荡的条件

正弦波产生电路的目的就是使电路产生一定频率和幅度的正弦波，我们一般是在放大电路中引入正反馈，并创造条件，使其产生稳定可靠的振荡。

正弦波产生电路的基本结构是：引入正反馈的反馈网络和放大电路。

其中：接入正反馈是产生振荡的首要条件，它又被称为相位条件；产生振荡必须满足幅度条件；要保证输出波形为单一频率的正弦波，必须具有选频特性；同时它还应具有稳幅特性。

因此，正弦波产生电路一般包括：放大电路；反馈网络；选频网络；稳幅电路四个部分。

我们在分析正弦振荡电路时，先要判断电路是否振荡。方法是：（重点）

是否满足相位条件，即电路是否是正反馈，只有满足相位条件才可能产生振荡；

放大电路的结构是否合理，有无放大能力，静态工作是否合适；

是否满足幅度条件，检验  $|\dot{A}\dot{F}|$ ，若：

(1)  $|\dot{A}\dot{F}| < 1$  则不可能振荡；

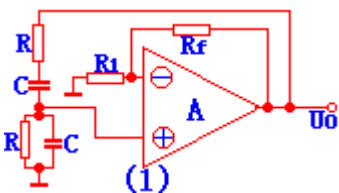
(2)  $|\dot{A}\dot{F}| \gg 1$  振荡，但输出波形明显失真；

(3)  $|\dot{A}\dot{F}| > 1$  产生振荡。振荡稳定后  $|\dot{A}\dot{F}| = 1$ 。此种情况起振容易，振荡稳定，输出波形的失真小

按选频网络的元件类型，把正先振荡电路分为：RC 正弦波振荡电路；LC 正弦波振荡电路；石英晶体正弦波振荡电路。

### 二：RC 正弦波振荡电路

常见的 RC 正弦波振荡电路是 RC 串并联式正弦波振荡电路，它又被称为文氏桥正弦波振荡电路。



串并联网络在此作为选频和反馈网络。它的电路图如图 (1) 所示：

它的起振条件为：  $R_f > 2R_1$  。它的振荡频率为：  $f_o = \frac{1}{2\pi RC}$

它主要用于低频振荡。要想产生更高频率的正弦信号，一般采用 LC 正弦波振荡电路。它

的振荡频率为：  $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  。石英振荡器的特点是其振荡频率特别稳定，它常用于振荡频率高度稳定的场合。

### 第三节：总结

这一章我们要掌握的问题是：

#### 1、非正弦波产生电路

- (1) 非正弦波产生电路的组成特点及其各部分的功能；（重点）
- (2) 非正弦波产生电路的波形计算；（重点）
- (3) 产生各种非正弦波电路的特点。

#### 2、正弦波产生电路

- (1) 正弦波产生电路的组成；
- (2) 正弦波产生电路中振荡的判断方法和相位条件的判断；（重点）
- (3) 文氏振荡电路的起振条件和输出频率的计算；
- (4) 各种振荡电路的特点。（重点）

#### 3、波形变换电路

在上一章我们已经学了，因此这一章我们就不再详述。

## 第八章 低频功率放大电路

低频功率放大电路的任务是：向负载提供足够的输出功率；具有较高的效率；同时输出波形的非线性失真的限制在规定的范围内。

在学习时我们把这一章分为：

- 低频功率放大电路的概述
- 互补对称功率放大电路
- 总结

### 第一节：低频功率放大电路的概述

这一节我们主要学习功率放大电路的一些知识。

#### 一：功率放大电路的分类

按放大电路的频率可分为：

低频功率放大电路和高频功率放大电路。这一节我们只学习低频功率放大电路。

按功率放大电路中晶体管导通时间的不同可分：

甲类功率放大电路、乙类功率放大电路和丙类功率放大电路。

甲类功率放大电路，在信号全范围内均导通，非线性失真小，但输出功率和效率低，因此低频功率放大电路中主要用乙类或甲乙类功率放大电路。

#### 二：功率放大电路的特殊问题

##### 1、功率放大电路的输出功率

功率放大电路的任务是推动负载，因此功率放大电路的重要指标是输出功率，而不是电压放

大倍数。

## 2、功率放大电路的非线性失真

功率放大电路工作在大信号的情况时，非线性失真时必须考虑的问题。因此，功率放大电路不能用小信号的等效电路进行分析，而只能用图解法进行分析。

## 3、功率放大电路的效率

效率定义为：输出信号功率与直流电源供给功率之比。放大电路的实质就是能量转换电路，因此它就存在着转换效率。

## 第二节：互补对称功率放大电路

这一节我们学习互补功率放大电路的一些知识。

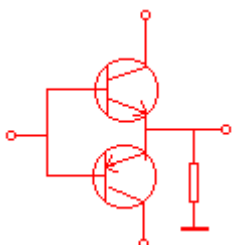
### 一：双电源互补对称电路（OCL 电路）

它的电路图如右图所示：图中的三级管分别为：NPN 管和 PNP 管。它在工作时要保持很好的对称性，并且正负电源对称，它们均工作在乙类。

#### 1、指标计算

(1) 最大输出功率  $P_o$

$$P_o = \frac{1}{2} \frac{(U_{CC} - U_{CES})^2}{R_L} \quad \text{注：如果是单电源功率放大电路，则：} \quad P_o = \frac{1}{2} \frac{(\frac{1}{2}U_{CC} - U_{CES})^2}{R_L}$$



#### 2、存在问题

(1) 交越失真

我们在分析时，是把三极管的门限电压看作为零，但实际中，门限电压不能为零，且电压和电流的关系不是线性的，在输入电压较低时，输出电压存在着死区，此段输出电压与输入电压不存在线性关系，产生失真。这种失真出现在通过零值处，因此它被称为交越失真。

我们克服交越失真的措施是：避开死区电压区，使每一晶体管处于微导通状态，一旦加入输入信号，使其马上进入线性工作区。

(2) 复合管组成互补对称电路

功率放大电路的输出电流均很大，而一般功率管的放大系数均不大，为此我们要进行电流放大，一般是通过复合管来解决这个问题。（不详述）

(3) 功率管选择原则

选择原则为： $P_{CM} \geq 0.2P_{OM}$ ； $BU_{CEM} \geq 2U_{CC}$ ； $I_{CEM} \geq I_{Lm}$

## 二：单电源互补对称电路（OTL 电路）

双电源互补对称电路需要两个正负独立电源，因此有时很不方便。当仅有一路电源时，则可采用单电源互补对称电路。它有时又被称为无输出变压器电路，OTL 电路（Output Transformer Less）

### 第三节：总结

这一节我们要掌握的问题有：

- 1、各种功率放大电路的放大管得导通角（重点）
- 2、互补对成功率放大电路的工作原理

- (1) 基本 OCL 电路的原理，及存在的问题（重点：交越失真）
- (2) 交越失真的产生原因，克服交越失真的两种方法。
- (3) 单电源（OTL）电路
- (4) 最大不失真输出功率的计算。（重点）
- (5) 功率管选择的原则。

单片机自学网---期待着与您一起进步！

<http://www.c51.cn> <http://www.c51mcu.com>

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>



## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>