

没看：

基本运算放大电路

波形变换电路

电源

管子特性

- (1) 半导体、本征半导体、杂质半导体
- (2) PN结
 - PN结的形成**
 - PN结的单向导电性**（解释）
 - PN结的伏安特性
 - 反向击穿
 - PN结的电容效应
 - 温度对二极管伏安特性的影响
- (3) 晶体三极管（双极性三极管，Bipolar Junction Transistor, BJT）
 - 结构、分区
 - 特性曲线
 - 温度对BJT的影响
 - (fudan)BJT的BE结是正温度系数还是负温度系数
- (4) 场效应管（FET, Field Effect Transistor）
 - 关于MOS：
 - (Tsinghua)老师3：如果二氧化硅做薄一点对三极管电流有什么影响？
 - MOS管有增强型和耗尽型，他们两者的区别是什么？
- (5) JFET和MOSFET比较（结型场效应管、MOS场效应管）★
- (6) BJT与MOSFET比较（晶体管、场效应管）★
 - BJT的B是什么意思？——双极性，两种载流子参与导电（多子和少子）
 - MOS管是几种载流子导电？

放大电路

- (7) 放大的性能指标
- (8) 阐述三极管放大电路的种类与优缺点
 - 共射
 - 共集
 - 共基
 - 比较：
- (9) 集成运算放大器
 - 集成运放的组成：**
 - 运放 / 运算放大器 (Operation Amplifier)**
 - 虚短与虚断
- (10) 零点漂移、差分放大电路
 - 零点漂移（温漂）
 - (fudan)为什么使用差分管，而不是单管
- (11) 电流源电路
- (12) 频率响应
- (13) 反馈
 - 反馈：**
 - 反馈类型**
 - 负反馈的四种基本组态**
 - 开环增益、反馈系数、闭环增益
 - 深度负反馈的实质
 - 负反馈对性能影响
 - 引入负反馈的一般原则
 - 自激振荡
- (14) 基本运算电路

- (15) 有源滤波电路
 - 无源滤波缺点:
 - 改进:
- (16) 运算电路与有源滤波电路
- (17) 波形产生与变换电路
 - 正弦波振荡电路
 - 电压比较器
 - 波形变化电路
- (18) 功率放大器
 - 电压放大器与功率放大器的区别:**
 - BJT的几种工作状态:
 - 互补功放电路:
 - 选功放管时的极限参数:
- (19) 放大器线性失真与非线性失真的差别
- (20) 什么是静态工作点, 其作用是什么?
- (21) 调频、调幅、调相

管子特性

(1) 半导体、本征半导体、杂质半导体

- 半导体: 导电性能 介于 导体、绝缘体之间

本征半导体: 化学成分纯洁的半导体

① 载流子:

自由电子: 温度升高/光照, 有的电子就能挣脱原子核的束缚, 成为自由电子, 参与导电

空穴: 在自由电子产生的同时, 原来的共价键处就会出现空穴

② **导电原因:** 本征激发、复合 --> 动态平衡 --> 于是能靠载流子**微弱**的导电

③ **受温度影响!**: 温度升高-->载流子浓度升高-->导电能力提高

杂质半导体: 在本征半导体中掺入少量的杂质元素

① N型半导体: (掺入+5价的杂质元素, 如: P)

+5价元素形成共价键时会多出一个自由电子 --> **主要靠自由电子导电**(Negative: N型)

--> **多子: 自由电子** --> 掺杂浓度影响, 与温度无关

--> **少子: 空穴** --> 本征激发产生, 与温度相关

② P型半导体: (掺入+3价杂质元素, 如: N) (其他同理)

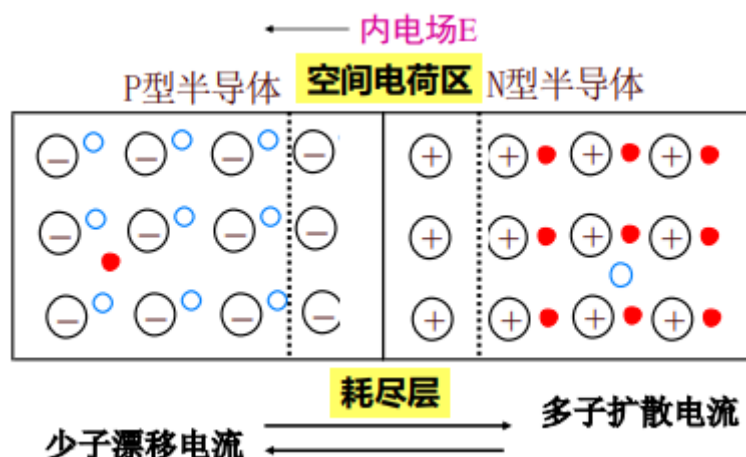
(2) PN结

扩散运动、漂移运动

- **扩散运动:** 因**浓度差**而产生的运动
- **漂移运动:** 因**电场**作用而产生的运动

PN结的形成

P、N型半导体结合 --> 因多子浓度差 --> 多子扩散 --> 形成空间电荷区 --> 形成内电场 --> 阻止多子扩散，促进少子漂移



PN结的单向导电性（解释）

① PN结加正向电压：

随正向电压增大，现有一段死区电压，然后扩散急剧增大

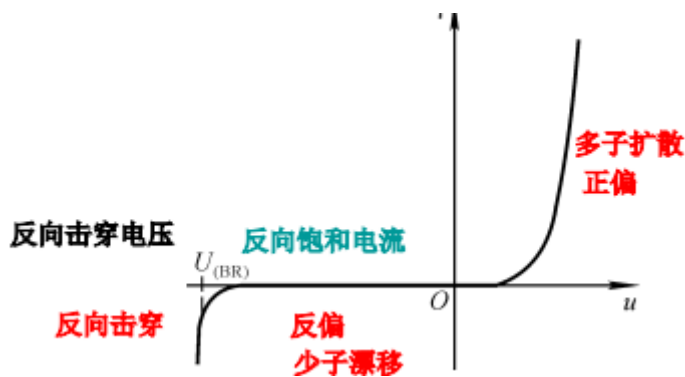
【急剧增大的原因：势垒高度随外加电压线性下降，而载流子浓度随外加电压呈指数变化，所以定性分析可得出正偏是流过PN结的电流随外加电压指数增加】

即：具有较大的正向扩散电流，PN结导通，呈现低电阻

② PN结加反向电压：

即：具有很小的反向漂移电流，PN结截止，呈现高电阻

PN结的伏安特性



死区电压：Si: 0.2-0.3, Ge: 0.6-0.7

反向击穿

① 两个 可逆的电击穿

- 雪崩击穿（掺杂低）（正温度系数：温度越高，击穿所需电压越高）
 - 原理：当电子或空穴穿过空间电荷区时，由于电场的作用，它们的能量会增加；当它们的能量大到一定程度并且与耗尽区的原子内的电子碰撞时，会产生型的电子空穴对，新的电子空穴对又会撞击其他原子内的电子，形成雪崩效应
- 齐纳击穿（掺杂高）（负温度系数）
 - 重掺杂的PN结由于隧道机制而发生齐纳击穿，在重掺杂的PN结内，反偏条件下两侧的导带与价带离得非常近，以至于电子可以直接从P区的价带隧穿到N区的导带。

② 电击穿（可逆）：在电流较大变化范围内，电压基本不变（可做稳压二极管）

热击穿（不可逆）

PN结的电容效应

① 势垒电容：外加电压不同，耗尽层宽窄变化所等效的电容

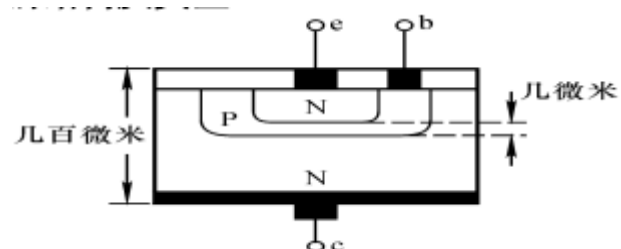
② 扩散电容：外加电压不同，PN结两侧堆积少子浓度不同

温度对二极管伏安特性的影响

温度越高：正向特性左移（扩散运动更剧烈），反向特性下移（本征激发少子更多，漂移运动更剧烈）

(3) 晶体三极管（双极性三极管，Bipolar Junction Transistor, BJT)

结构、分区



基区b：做的很薄，浓度低

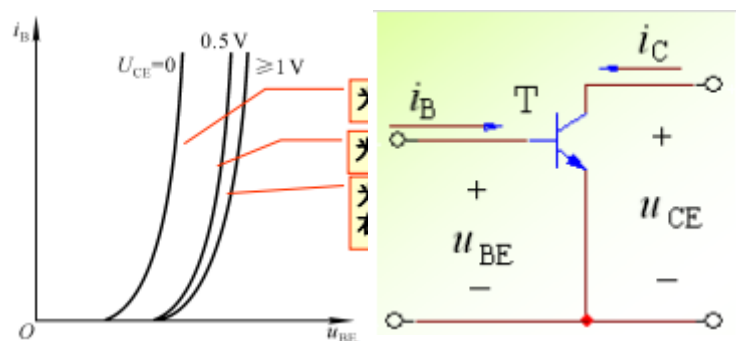
发射区e：掺杂浓度高

集电区c：面积大，掺杂浓度低

b浓度低是为了形成**很小的基极电流**，做的薄是为了**减小体电阻和便于集电极收集电子**，发射区的掺杂浓度最高，所以当全部自由电子开始往基极方向运动时，一部分和基区的空穴复合形成基极电流，即输入电流；其余多数都被集电结漂移到集电极去了，从而与集电极反偏电压提供的空穴复合，形成集电极电流，即输出电流，这就是小电流控制大电流的原因；如果基区掺杂浓度高那么输出电流就会相应减小，且基区浓度越高集电极电流越小，若果此时做的还很厚那么电流流过时损耗就会增大

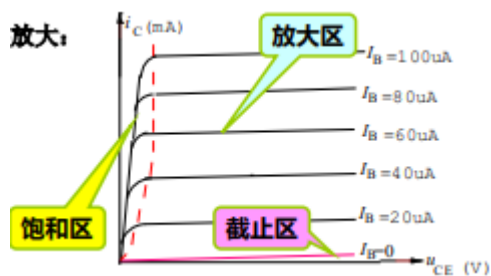
特性曲线

① 输入特性曲线：



分析： $U_{CE}=0V$ 时，集电极与射极短路，就是PN结的伏安特性曲线。当集电极电压逐渐增大的时候，集电结的正偏慢慢的变成了反偏，漂移运动逐渐增强，集电结收集电子的能力逐渐增强，所以当相同 U_{BE} 的情况下， U_{CE} 变大流向基极的电流 I_B 变小。而当 $U_{CE}=1V$ 的时候，集电结已经将发射结扩散到基区的电子全部收集走，所以当 $U_{CE}>1V$ 的时候，曲线几乎不再左移。

② 输出特性曲线：



- **截止区：**发射结反偏。 $I_B=0$ ，此时的 I_C 是穿透电流 I_{CEO} 。
- **放大区：**发射结正偏，集电结反偏。 I_C 完全受 I_B 的控制，而且 $I_C/I_B \approx \beta$ 。
- **饱和区：**发射结正偏，集电结正偏。此时从图中可以看出来 I_C 不受 I_B 的控制，整个三极管就类似于一个大导体，双结正偏。这时又一个 U_{CES} 饱和压降。判断： $i_B > I_{BS} \approx \frac{V_{cc}}{\beta R_c}$

温度对BJT的影响

输入特性左移（同PN结，扩散运动更剧烈）

输出特性上移（相当于 β 略微增大）

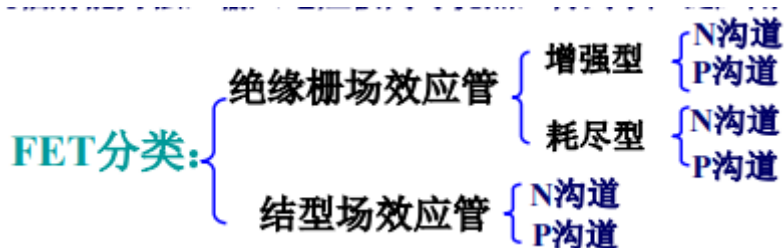
(fudan)BJT的BE结是正温度系数还是负温度系数

（不知道）BE结其实就是PN结，温度升高时，PN结正向电流增大、正向压降减小

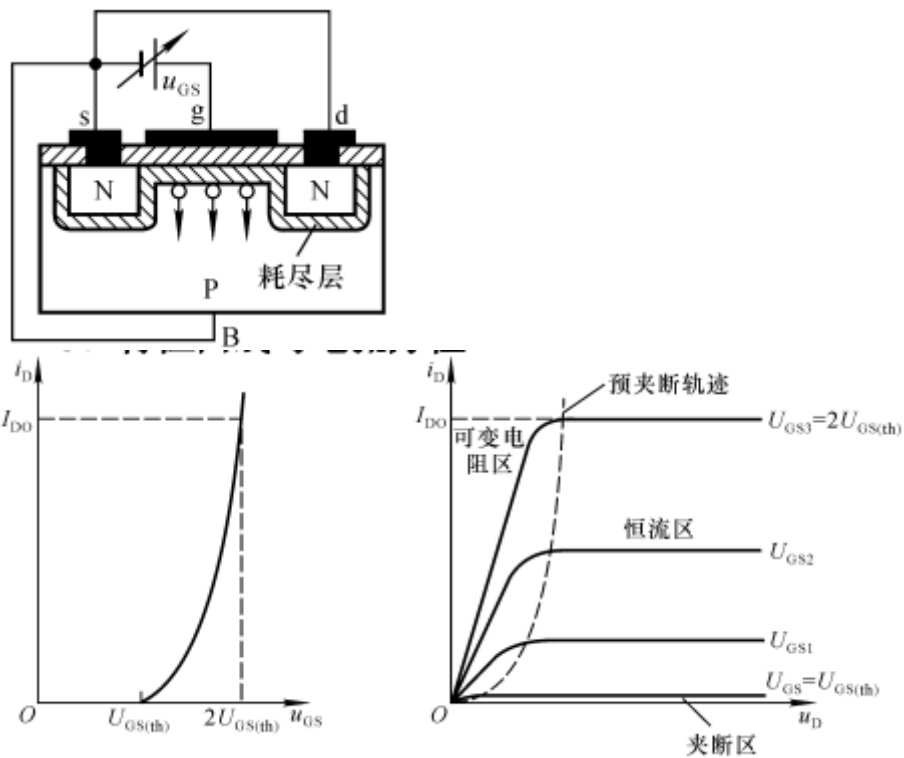
- 考虑压降是负温度系数的，温度升高时，PN结正向压降大约呈线性减小，利用这一特性，可以将其做成温度传感器。

晶体二极管或三极管的PN结的结电压是随温度而变化的。例如硅管的PN结的结电压在温度每升高 1°C 时，下降 -2mV ，利用这种特性，一般可以直接采用二极管（如玻璃封装的开关二极管 1N4148）或采用硅三极管（可将集电极和基极短接）接成二极管来做PN结温度传感器。这种传感器有较好的线性

(4) 场效应管（FET，Field Effect Transistor）



- N沟道增强型特性曲线（增强型NMOS）



◦ u_{GS} 的影响

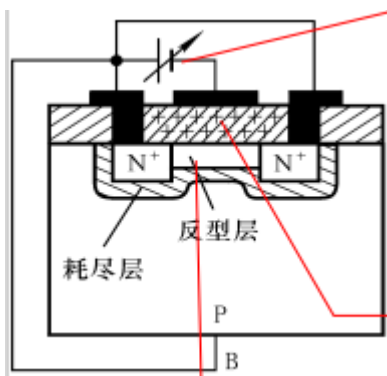
最初d、s之间是没有沟道的，随着 u_{GS} 的增大 ($u_{GS} > U_{GS(th)}$)，开始出现沟道，管子导通

随 u_{GS} 的不同，沟道宽窄也不同 --> 可变电阻区

◦ 在 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 时， u_{DS} 的影响

在夹断之前是可变电阻，夹断之后进入恒流区

• N沟道耗尽型 (耗尽型NMOS)

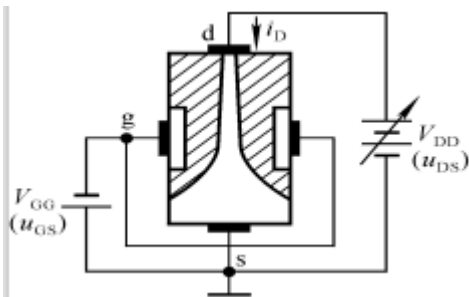


天生就存在沟道， u_{GS} 间加反向电压，

当 $U_{GS(off)} < u_{GS}$ ，管子导通

当 $u_{GS} < U_{GS(off)}$ ，管子截止

• 结型场效应管 (JFET)



天生就存在沟道, u_{GS} 间加反向电压,

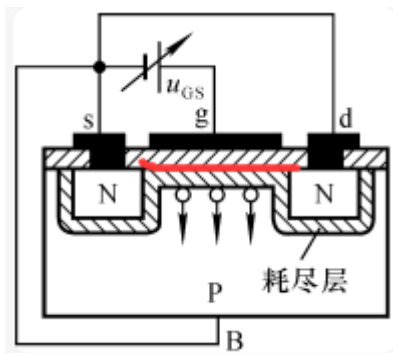
当 $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$, 管子导通

当 $u_{GS} < U_{GS(off)}$, 管子截止

关于MOS:

(Tsinghua)老师3: 如果二氧化硅做薄一点对三极管电流有什么影响?

MOS管的栅极与SiO₂相连, 是绝缘的, 感应电荷不易泄放, 因此可以将栅极看做一个小电容, SiO₂绝缘层越薄, 越容易击穿。



(红色标注部分为SiO₂)

MOS管有增强型和耗尽型, 他们两者的区别是什么?

增强型:

- 最初d、s之间是没有沟道的——天生截止
- 随着 u_{GS} 的增大 ($u_{GS} > U_{GS(th)}$), 开始出现沟道, 管子导通

耗尽型:

- 通过在SiO₂绝缘层添加正离子, 使天生就存在沟道——天生导通
- 随着 u_{GS} 反向电压的增大 ($u_{GS} < U_{GS(off)}$), 沟道开始夹断, 管子截止

(5) JFET和MOSFET比较 (结型场效应管、MOS场效应管) ★

都是单极性场效应管

JFET: 通过外加电压 u_{GS} 改变半导体内的电场效应, 改变PN结耗尽层的宽窄, 从而改变导电沟道的电阻来控制电流 i_D

MOSFET: 通过外加电压 u_{GS} 改变半导体表面的电场效应, 改变感生沟道的宽窄, 从而控制电流 i_D

(6) BJT与MOSFET比较 (晶体管、场效应管) ★

	双极型三极管	单极型场效应管
载流子	多子扩散、少子漂移	多子运动 (N沟道：电子) (没有少子温度稳定性也更好)
控制	电流 i_B 控制电流 i_C	电压 u_{GS} 控制电流 i_D
输入电阻	几十到几千欧	几兆欧（很大，SiO ₂ 绝缘）
噪声	大	小
静电影响	不受	受
制造工艺	不宜大规模集成	宜大规模集成

BJT的B是什么意思？——双极性，两种载流子参与导电（多子和少子）

BJT: Bipolar Junction Transistor - 双极性三极管/晶体三极管

B指双极性，BJT中有两种载流子参与导电（多子与少子）

这里的两种载流子是相对于MOS管做区分的（只有多子参与导电）

MOS管是几种载流子导电？

答：一种载流子，多子运动导电，如NMOS是自由电子导电、PMOS是空穴导电

放大电路

(7) 放大的性能指标

- 放大倍数（在不失真的前提下才有意义）
- 输入电阻**：从放大电路输入端看进去的等效电阻
 - $R_i = U_i / I_i$
 - 输入电阻越大越好。
 - 当信号源有内阻 r_i 时， R_i 越大，输入电压 u_i 就越接近电源电压 u_s
- 输出电阻**：从放大电路输出端看进去的等效电阻
 - $R_o = \frac{u_o}{i_o} \Big|_{R_L=\infty, u_s=0}$ （信号源置0，负载无穷大时的输出等效电阻）
 - 输出电阻越小越好
 - R_o 越小，放大电路带负载的能力越强
- 通频带
 - $0.707|A_m|$ 对应的频率范围 $f_{bw} = f_H - f_L$
 - 用于衡量放大电路对不同信号的放大能力
- 非线性失真系数：
 - 输出波形中的谐波成分总量与基波成分之比

$$D = \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{A_3}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{A_4}{A_1}\right)^2 + \dots}$$

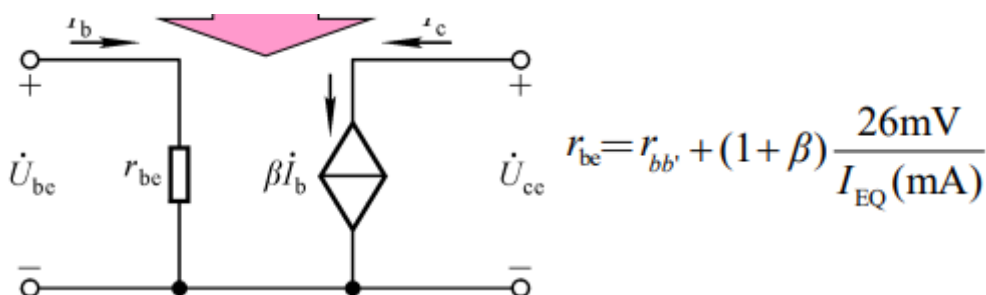
- 最大不失真输出电压
 - 当输入电压再增大，就会使输出波形产生非线性失真，则此时的输出电压，称之为最大不失真输出电压。

- 一般用有效值 U_{om} 表示。
- 最大输出功率与效率
 - 最大输出功率 P_{om} ：在输出信号不失真的情况下，负载上能够获得的最大功率
 - 直流电源能量的利用率： $\eta = \frac{P_{om}}{P_V} = \frac{\text{最大输出功率}}{\text{电源消耗功率}}$

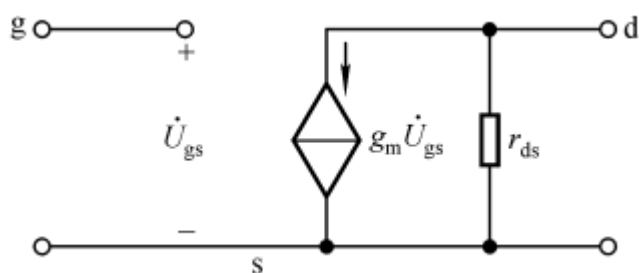
(8) 阐述三极管放大电路的种类与优缺点

共射

- 静态工作点
 - $U_i=0$ 时电路的工作状态
 - 目的：为了使三极管工作在线性区，保证放大电路不产生失真
- 非线性失真
 - 截止失真（截顶，顶部失真）（在输出特性曲线的右下）
 - 饱和失真（饱底，底部失真）（在输出特性曲线的左上）
- 三极管的共射低频h参数等效模型（简化的）



场效应管，交流小信号模型：



共集

- 作为射极输出器
 - 电压放大倍数 ≈ 1
 - 输入阻抗高，输出阻抗小
- 应用：
 - 放在多级放大器的输入端，提高整个放大器的输入电阻
 - 放在多级放大器的输出端，减小整个放大器的输出电阻
 - 放在两级之间，起缓冲作用

共基

- 频带宽，常用于无线电通讯

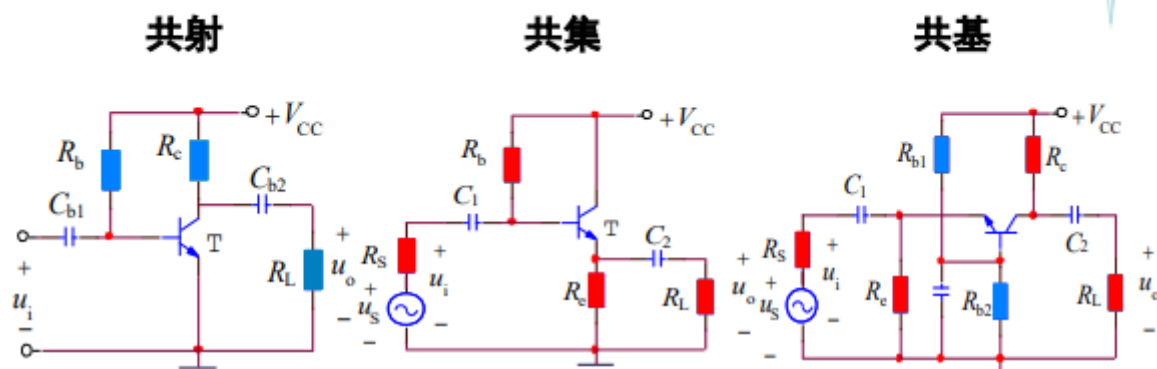
比较：

	共射	共集（电压跟随器）	共基
输入与输出	反相	同相	同相
电压放大	$\sqrt{\quad}$	≈ 1	$\sqrt{\quad}$
电流放大	$\sqrt{\quad}$	$\sqrt{\quad}$	≤ 1
输入电阻	大	大	小（会使输入信号严重衰减，不适合作为电压放大器）
输出电阻	大	小	大
频率特性	差（一般采用负反馈改善频率特性）		好
适用于	低频电压放大单元	在多级放大单元中输入输出缓冲级	宽频带放大电路

阐述三极管放大电路的种类与优缺点

- 共射：低频电压放大单元，但是频率特性不好（可以引入负反馈改善）
- 共集：电压放大倍数约为1，输入电阻大、输出电阻小，用作电压跟随器，用作输入、输出、中间级缓冲电路
- 共基：频率特性好，可用作宽频放大电路。但是输入电阻小，输入信号衰减严重

三种组态的比较



电压增益: $-\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$

1

$\frac{\beta \cdot (R_c // R_L)}{r_{be}}$

输入电阻: $R_b // r_{be}$

$R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_c // R_L)]$

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

输出电阻: R_c

$R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{1 + \beta}$

R_c

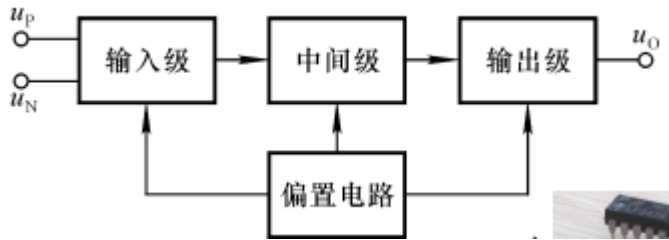
低频电压放大单元电路

输入输出中间级

宽频带放大电路

(9) 集成运算放大器

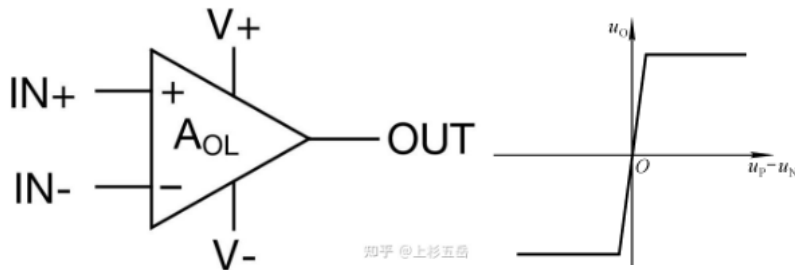
集成运放的组成：



- 输入级：高性能差分放大电路，输入电阻高
- 中间级：强放大能力，常采用复合管
- 输出级：多采用互补对称输出电路，输出功率大
- 偏置电路：设计集成运放各级放大电路的静态工作点，采用恒流源

运放 / 运算放大器 (Operation Amplifier)

- 一般有5个引脚：正输入、负输入、输出、正电源、负电源
低频时：输入端（等效一个大电阻）、输出端（电压源 + 等效电阻）
输出特性：线性区&饱和区



- 开环：可以做电压比较器
- 闭环：引入反馈，可以实现常用的运算放大电路
- 基本特点：
 - 双端输入，单端输出
 - 具有极高的电压增益（开环电压放大倍数）
 - 具有很强的共模抑制能力
 - 具有下限从直流开始的频带
- 理想运放特性
 - 放大倍数无穷大
 - 输入电阻无穷大
 - 输出电阻为0

虚短与虚断

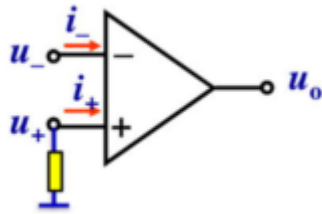
- 条件：运放工作在线性区（引入负反馈，使深度负反馈）
- 虚短：
 - 集成运放的两个输入端电位无穷接近，但又不是真正短路的特点。
 - 原因：运放的放大倍数很大(>80dB)，但是输出电压有限(10-14V)，因此输入差模电压特别小，两个输入端近似等电位。
- 虚断：
 - 集成运放的两个输入端的电流趋于0，但又不是真正断路的特点。
 - 原因：因为运放的输入阻抗很大，几乎没有电流可以流入运放的输入端，因此可以近似将运放的两个输入端看做断路
- 虚地：

- 当运放的一个输入端通过电阻与地相连时，两个输入端的电位都可以看做是地电位

由虚断： $u_+ = 0$

由虚短： $u_+ = u_-$

因此有： $u_- = 0$



(10) 零点漂移、差分放大电路

零点漂移 (温漂)

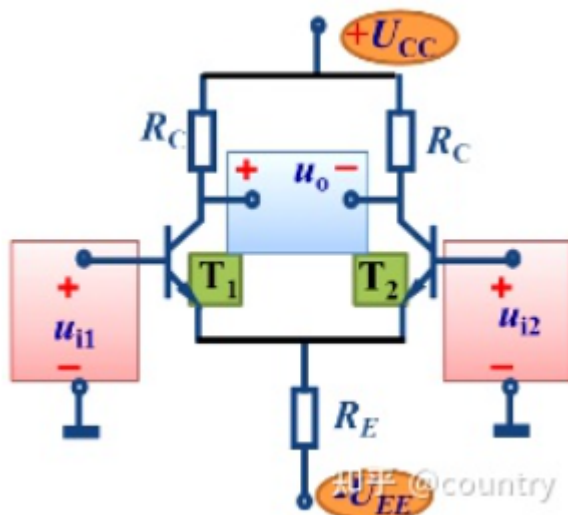
- 现象：输入电压为零而输出电压不为零且缓慢变化的现象，主要是温度引起的
- 解决：
 - 引入**直流负反馈**，稳定静态工作点 (如Re)
 - 温度补偿**的方法。(二极管)

温度补偿指：用另外一个元器件的漂移来抵消放大电路的漂移，如果参数配合得当，就能把漂移抑制在较低的限度之内。温度补偿，在集成电路里面把两个相似的二极管放的很近，让他们感受温度都相似。

- 采用特性相同的管子，使它们的温漂相互抵消，“**差分放大电路**”

(fudan)为什么使用差分管，而不是单管

- 差分放大电路：
 - 采用特性相同的两个管子，使它们的温漂相互抵消，有效抑制零点漂移 (温度漂移)

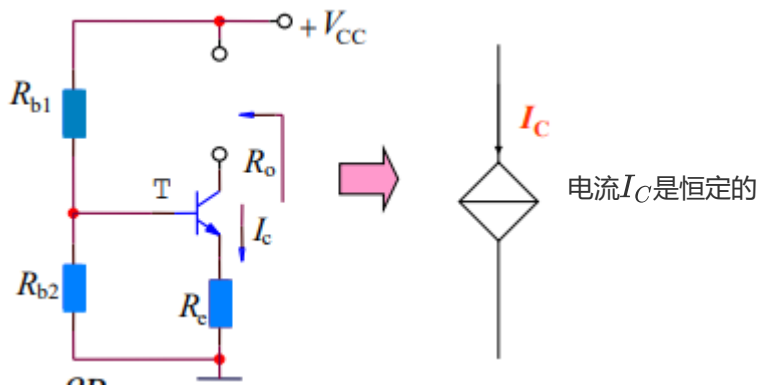


电路的输入可以分为 共模信号+差模信号

- 共模信号**：大小相同，极性相同
 - 电路对共模信号有很强的抑制作用
- 差模信号**：大小相同，极性相反
 - 电路对差模信号无影响，即放大差模信号

(11) 电流源电路

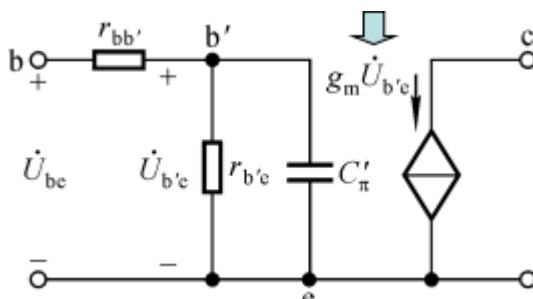
- 构成：用普通的三极管接成**电流负反馈电路**
 - eg：射极偏置放大电路



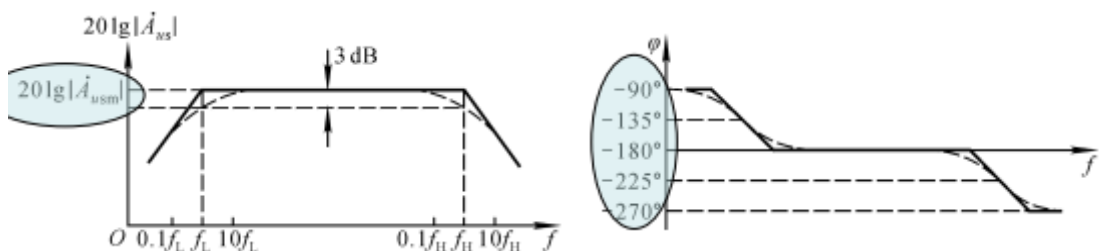
- 应用：带恒流源的差分放大电路
 - 增大 R_e ，可以**提高共模抑制比**(减小共模放大、差模放大不变)，因此可以用恒流源替代 R_e
- 典型电路：镜像/比例/多路/微电流源

(12) 频率响应

- 原因：放大电路中**电抗元件**及**晶体管极间电容**的存在, 频率变化时,放大倍数也变化,并产生相移
- 基本电路：
 - RC高通，从R输出， f_L 为**下限截止频率**
 - RC低通，从C输出， f_H 为**上限截止频率**
- BJT高频等效模型——混合 π 型模型



- 分频研究：
 - 极间电容 - 小电容 - 高频考虑
 - 耦合/旁路电容 - 大电容 - 低频考虑
 - 中频：极间电容-开路，耦合电容-短路
 - **低频**：极间电容-开路，**耦合电容-考虑**
 - **高频**：**极间电容-考虑**，耦合电容-短路
- 波特图（基本共射）



读波特图：

- 几级放大电路：由高频段决定

- 拐点个数：决定有几个上下限截止频率
 - 波特图的斜率值决定：低频时有几个C起作用，高频时电路有几级放大电路
- -3dB 带宽：增益下降3dB所对应的带宽，其值越大越好
- 频率响应的指标
 - 通频带
 - 带宽增益积（一般为常数，增益增大多少倍，带宽就变窄多少倍）

(13) 反馈

反馈：

- 将放大电路输出量的一部分或全部，通过一定的方式引回输入回路，与输入信号进行比较（相加或相减），并用比较得到的有效输入信号去控制输出



反馈类型

- 正反馈与负反馈：引入反馈后使净输入量增大/减小的反馈
 - 瞬时极性法
- 直流反馈与交流反馈：反馈信号存在与放大电路直流/交流通路中
 - 画直流、交流通路
- 电压反馈与电流反馈：反馈量取决于、并正比于输出电压/电流
 - 输出短路法：令输出短路，
 - 若反馈信号消失，则为电压反馈
 - 若反馈信号仍存在，则为电流反馈
- 串联反馈与并联反馈：反馈量与输入量在输入回路以电压/电流的形式相加减
 - 判断输入量与反馈量是否作用在同一点（是否同在输入或输出端）
 - 作用在不同的两点，串联反馈
 - 作用在同一点，并联反馈
- 本级反馈与级间反馈

负反馈的四种基本组态

- 电压串联负反馈——电压控制电压
- 电压并联负反馈——电流控制电压
- 电流串联负反馈——电压控制电流
- 电流并联负反馈——电流控制电流

开环增益、反馈系数、闭环增益

开环增益	反馈系数	闭环增益
$\dot{A} = \frac{\dot{X}_O}{\dot{X}_i'}$	$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_O}$	$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_O}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$

闭环增益的分母 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 称作 **反馈深度**

当环路增益 $\dot{A}\dot{F} \gg 1$ 时，这个公式可以写成 $\dot{A}_f \approx 1/\dot{F}$ ，此时为**深度负反馈**

深度负反馈的实质

- 放大倍数： $A_f = A/(1+AF) \approx 1/F$ 【闭环放大倍数主要取决于反馈系数，与开环增益几乎无关】
- $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$
- 输入量近似等于反馈量，净输入量近似等于零
- **深度负反馈条件下，基本放大电路“虚短”、“虚断”**

负反馈对性能影响

- 提高增益稳定性（同时降低了增益）
- 改变输入（“串入多”）输出（“压出少”）电阻
- 扩展频带（带宽增益积：降低增益）
- 减小非线性失真（深度负反馈，运放工作在线性区）

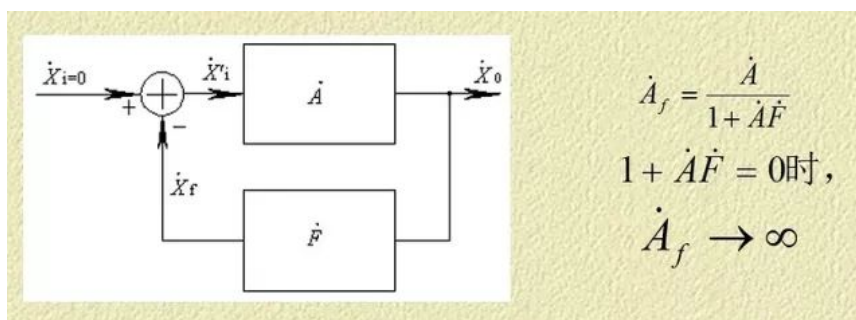
【提升/减小的倍率都是反馈深度 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 】

引入负反馈的一般原则

- 要稳定直流量——引直流负反馈
- 要稳定交流量——引交流负反馈
- 要稳定输出电压——引电压负反馈
- 要稳定输出电流——引电流负反馈
- 要增大输入电阻——引串联负反馈
- 要减小输入电阻——引并联负反馈
- 要增大输出电阻——引电流负反馈
- 要减小输出电阻——引电压负反馈

自激振荡

- 幅值平衡条件： $|\dot{A}\dot{F}| = 1$
- 相位平衡条件： $|\varphi_A + \varphi_F = (2n + 1)\pi|$
- 放大电路级数越多，耦合、旁路电容越多，引入负反馈的越深，产生自激振荡的可能性越大



$$1 + \dot{A}\dot{F} = 0 \quad \dot{A}\dot{F} = -1$$

产生自激振荡的幅值条件为： $|\dot{A}\dot{F}| = 1$

产生自激振荡的相位条件为：

$$\varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = \pm (2n+1)\pi \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

(14) 基本运算电路

前提：集成运放工作在**线性区**，在**深度负反馈**条件下，当输入电压变化时，输出电压将按一定的数学规律变化

- 比例运算电路
- 加减运算电路
- 积分运算电路
- 微分运算电路
- 对数运算电路
- 指数运算电路

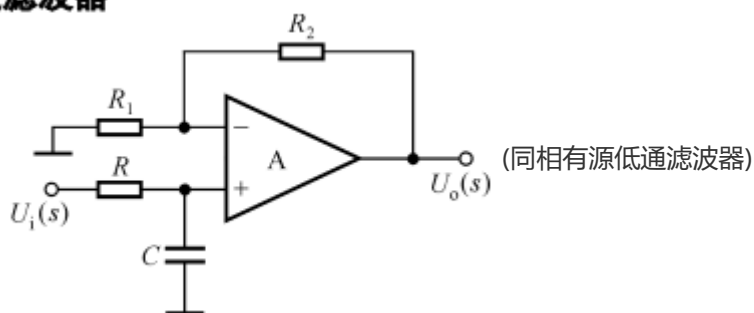
(15) 有源滤波电路

无源滤波缺点：

- 带载能力差，带负载后，通带放大倍数的值减小，通带截止频率升高
- 通带放大倍数和通带截止频率随负载而变化

改进：

- 加入电压跟随器



- 于是，负载变化，放大倍数、频率特性都不会改变

无源滤波器：这种电路主要有无源元件**R、L和C**组成

有源滤波器：**集成运放和R、C**组成，具有不用电感、体积小、重量轻等优点。

集成运放的**开环电压增益**和**输入阻抗**均很高，**输出电阻**小，构成有源滤波电路后还具有一定的电压放大和缓冲作用。但集成运放带宽有限，所以目前的有源滤波电路的工作频率难以做得很高。

(16) 运算电路与有源滤波电路

相同：

- 电路均引入**深度负反馈**，集成运放工作在线性区
- 均有“虚短”、“虚断”特性

不同：

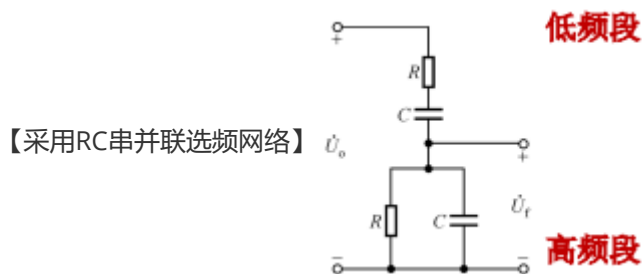
- 运算电路是**时域**问题，有源滤波是**频域**问题
- 运算电路用运算关系式描述**输出电压与输入电压**的关系，有源滤波器用电压放大倍数的**幅频特性**描述滤波特性
- 测试时，前者是在输入信号频率不变或直流信号下测量输出电压与输入电压有效值或幅值的关系（频率不变测幅度）
后者是在输入电压幅值不变的情况下测量输出电压幅值与输入电压频率的关系（幅度不变测频率）。

(17) 波形产生与变换电路

前提：**正反馈/开环** --> 工作在**非线性区** --> 有“**虚断**”特点 ($i_P = i_N \approx 0$)

正弦波振荡电路

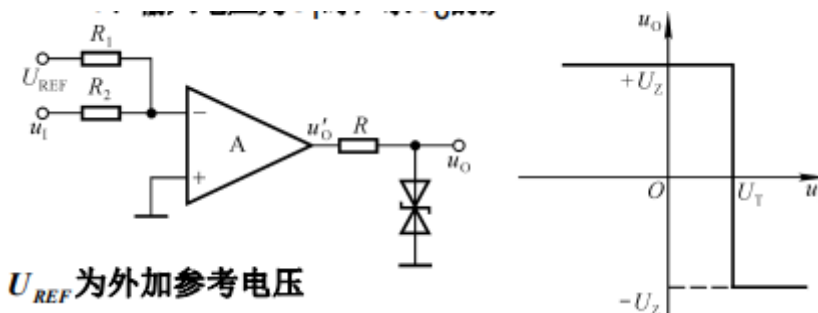
- **组成：**
 - 放大电路
 - 选频网络
 - 正反馈网络
 - 稳幅环节
- RC正弦波振荡电路 ——> 适用于中低频



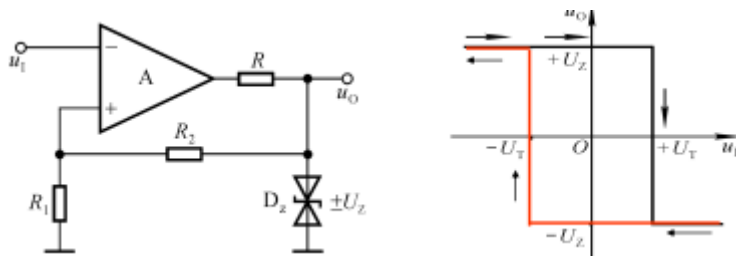
- LC正弦波振荡电路 ——> 适用于高频
 - 变压器式振荡器、电感三点式、电容三点式
 - 石英晶体振荡电路是一种特殊的LC振荡电路，具有很高的频率稳定性

电压比较器

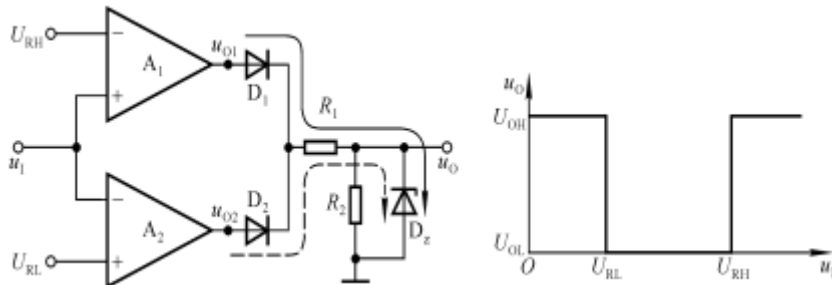
- 单限比较器——开环



- 滞回比较器——引入正反馈，抗干扰性强



- 窗口比较器



波形变化电路

- 在方波、锯齿波和三角波等非正弦波信号发生器中，运放一般也工作在非线性状态。电路由比较器、积分器等环节组成

(18) 功率放大器

电压放大器与功率放大器的区别：

- 电压放大
 - 不失真地提高输入信号的幅度，以驱动后面的功率放大级，通常工作在**小信号**状态。
 - 核心是多级共射放大电路，电压增益大
 - 设计目标是为了处理信号准备的
 - 设计难度在于信号放大时对噪声的抑制、频率特性的追求
- 功率放大
 - 信号不失真或轻度失真的条件下提高输出功率，以驱动巨大的用电器(用音箱等)，通常工作在**大信号**状态。
 - 核心是推挽型放大电路，输出功率很大
 - 设计目标是为传递和放大功率
 - 设计难度在于使用大功率元器件、复杂的热设计

BJT的几种工作状态：

- 甲类：Q点适中，在正弦信号的整个周期内均有电流流过BJT
 - 做功放，极限功率只有50%
 - 静态功耗大，能量转换效率低
- 乙类：静态电流为0，BJT只在正弦信号的半个周期内均导通
 - 做功放，有**交越失真**！！

交越失真：在零偏置情况下，考虑到导通电压的影响，输出波形在正负波形衔接处出现严重失真

解决思路：在输入端为两管加上合适的正偏电压/采用特性相同的二极管，使其工作在甲乙类

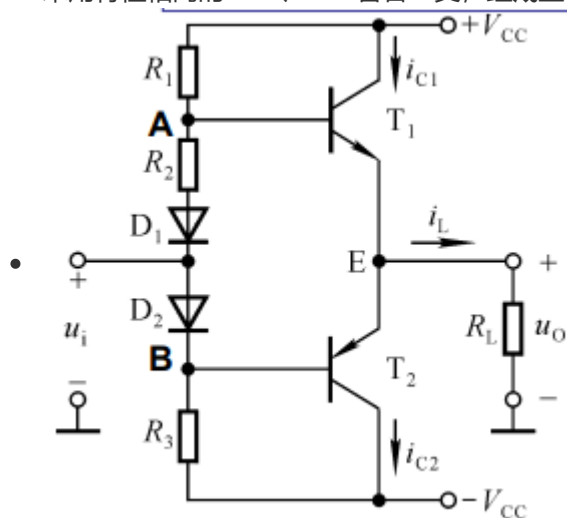
利用**甲乙类**双电源**互补对称功率放大电路**可以消除交越失真

- 但是效率最高，最大功率为78.5%

- **甲乙类**：介于两者之间，导通角大于 180°
 - 做功放最合适！！

互补功放电路：

- 采用特性相同的NPN、PNP管各一支，**组成互补对称式射极输出器**



- 静态时，使 $U_O = 0$
- 动态时，消除了交越失真

选功放管时的极限参数：

- 最大管压降
- 集电极最大电流
- 最大管耗

(19) 放大器线性失真与非线性失真的差别

- 线性失真：不会产生新的频率成分
 - 放大器的频率特性不好，对输入信号中不同频率成分的增益不同或延时不同，这样产生的失真成为线性失真
- 非线性失真：会产生输入信号中没有的新的频率分量
 - 放大器件的工作点进入了特性曲线的非线性区，使输入信号和输出信号不再保持线性关系，这样产生的失真称为非线性失真

(20) 什么是静态工作点，其作用是什么？

- 静态工作点：在三极管放大电路中，三极管静态工作点就是交流输入信号为零时，电路处于直流工作状态，此时的电流和电压值可以用BJT特性曲线上的某一点来表示，该点通常称为静态工作点Q
- 作用：
 - 确定放大电路的电压和电流的静态值
 - 选取合适的静态工作点，可以防止电路产生非线性失真，保证放大效果
 - 保证放大后的交流信号可以加入到电路中，无论是正半周还是负半周，以满足发射集正偏、集电极反偏。

(21) 调频、调幅、调相

- **调幅AM**：调制信号使载波的幅度随之变化

$$\text{已调信号: } U_{\text{AM}}(t) = U_m(t) \cos(\omega_c t)$$

$$= (U_{\text{cm}} + K_a U_{\Omega m} \cos \Omega t) \cos(\omega_c t)$$

$$= U_{\text{cm}} \left(1 + K_a \frac{U_{\Omega m}}{U_{\text{cm}}} \cos \Omega t \right) \cos(\omega_c t)$$

- **调频FM**：使瞬时角频率随调制信号做线性变化

$$\omega_f(t) = \omega_c + k_f U_{\Omega}(t) = \omega_c + k_f U_{\Omega m} \cos \Omega t = \omega_c + \Delta \omega_{\text{fm}} \cos \Omega t$$

- **调相PM**：使载波的相位随调制信号呈线性变化

$$\varphi(t) = \omega_c t + k_p U_{\Omega}(t) = \omega_c t + k_p U_{\Omega m} \cos \Omega t$$

- 调频和调相都会引起载波在频率和相位上的变化，不过二者变化的规律不同，调频是载波的角频率随调制信号变化，调相是载波的相位随调制信号变化。