

模拟电子电路-速通资料

前言

模拟电子技术这门课主要涵盖两方面内容：一是**半导体器件**（各种管子的原理）、而是**半导体应用**（这些管子可以帮我们做些什么）。具体而言，半导体器件包含二极管、晶体管、场效应管、集成运放四部分，半导体应用包含信号运算、信号调理、信号生成、电源（主要考线性电源）这四部分。

考试题型：选择填空、画图问答、计算。 本资料侧重对复习PPT和作业题中所涉及的定量计算、电路图分析的讲解，包括了复习PPT的所有内容。

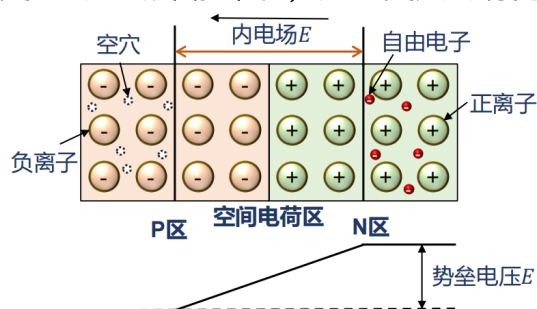
食用指南：

1. 如果复习时间充足，可以结合本资料和全套PPT复习，因为本资料主要基于复习PPT扩展编写，涵盖不全，还有相当多的内容在原始PPT上。
2. 如果复习时间紧张，可以优先使用本资料和老师提供的知识总结PPT。
3. 如果复习时间非常非常紧张，可以直接背诵老师提供的知识总结PPT上的概念和计算题。

半导体器件

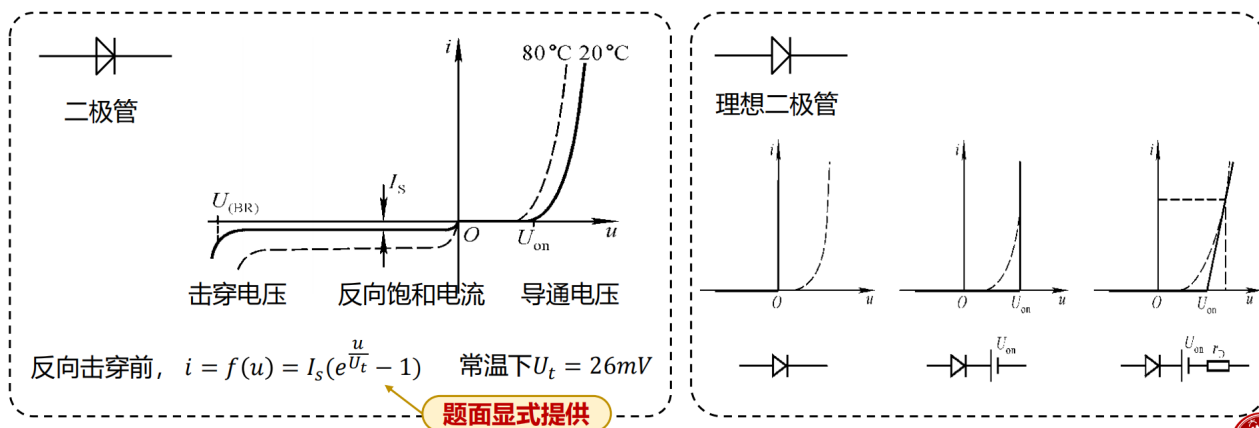
二极管

1. 本征半导体是指高度提纯、结构完整的半导体单晶体。
2. 本征半导体受激发后，产生两种载流子，分别是**自由电子**和**空穴**。
3. **N型半导体**中多数载流子是**自由电子**，**P型半导体**中多数载流子是**空穴**。
4. P型半导体和N型半导体均呈**电中性**。
5. P型半导体和N型半导体的交界面通过**扩散运动**和**漂移运动**形成PN结，静态时，漂移电流等于扩散电流，达到平衡如下图。【扩散是浓度梯度驱动的，哪里少往哪里走；漂移是电场力驱动的，空穴和自由电子受电场力作用形成电流，扩散电流和漂移电流方向相反，最终达到平衡】
6. PN结施加正向电压（从P型到N型）时，耗尽层变薄（把空穴和自由电子都往中间吸引，电中和导致耗尽层变薄）；施加反向电压（从N型到P型）时，耗尽层变厚（把空穴和自由电子往两侧吸引，中间更多的区域不能中和，产生更大的有内电场的区域）。



7. 二极管具有单向导电性，硅二极管的正向导通电压约为**0.7V**。

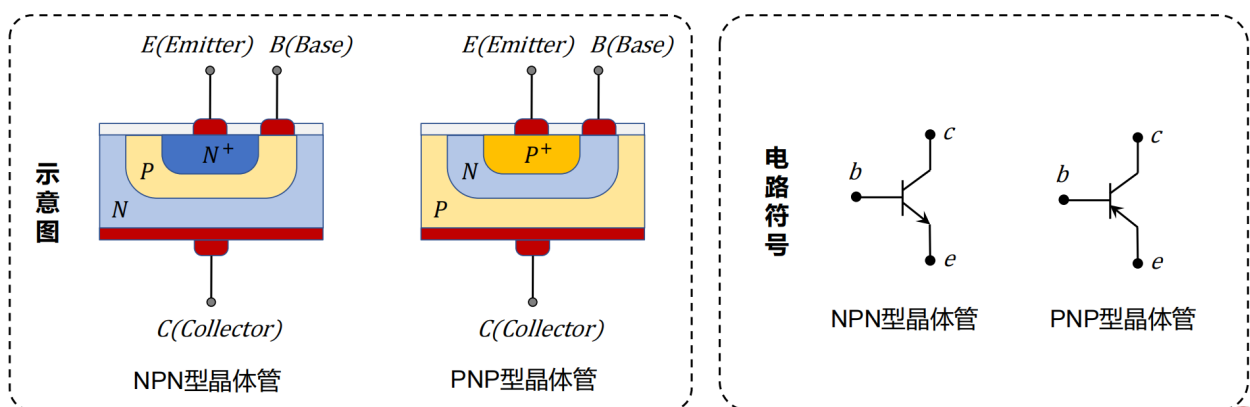
8. 稳压二极管工作在反向击穿区域，配合合适的限流电阻可输出稳定的电压。



晶体管

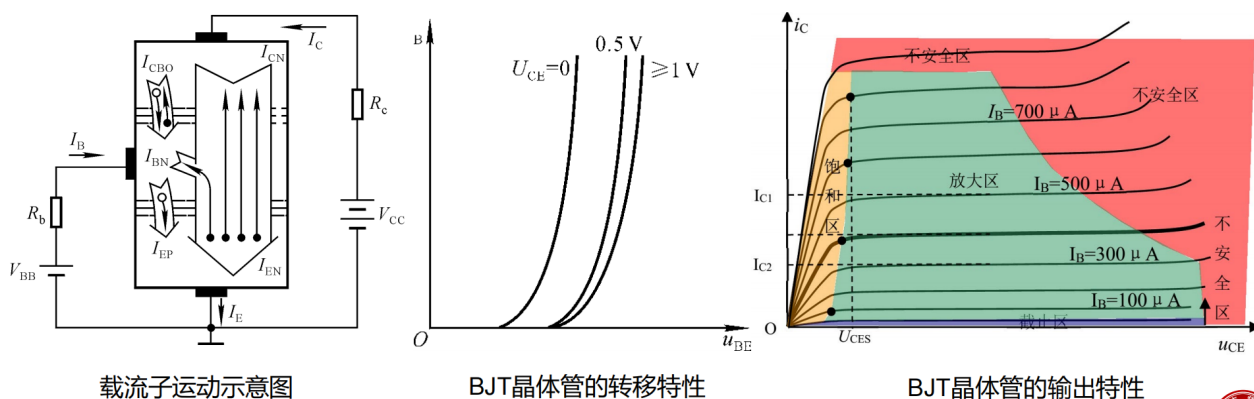
晶体管与放大电路的基本概念

1. BJT晶体管具有3个端口：基极(Base), 集电极(Collector), 发射极(Emitter); 有2个相互影响的PN结：发射结和集电结。
2. BJT晶体管分为NPN和PNP两种类型，示意图和电路符号如下。



【我试图发明了一种不懂原理记电路符号的方法，只看中间的字母，往外指的就是积极的 (P)，往里指的就是消极的 (N)】

3. BJT晶体管的发射结正偏、集电结反偏，使晶体管工作于放大区。
4. BJT晶体管工作于放大区时，具有电流放大功能，载流子运动示意图如下。
5. BJT晶体管的输出特性曲线分为：饱和区，放大区，截止区。放大区是我们选用的工作区间，特点是 i_C 几乎不受 u_{CE} 的影响，只与控制电流有关。



6. 微变等效电路：当晶体管工作于放大区时，发射结中微小的电流变化正比于C极的电流变化，且放大倍数与晶体管静态放大倍数近似相等。

7. 温度对BJT晶体管参数的影响：随着温度升高，晶体管放大系数 β 增大，由少子漂移形成 I_{CBQ} 的增大，发射结导通电压 U_{BE} 减小。
8. 晶体管的输入和输出可以组成二端口网络。按照输入输出公用的端口，可以分成：**共射极放大电路**、**共集电极放大电路**、以及**共基极放大电路**。
9. 共射极放大电路的电压和电流增益都大于1，电压输出相位与输入**相反**。
10. 共集电极放大电路只有**电流放大作用**，电压输出相位与输入同向，放大系数接近于1，又称为**射极跟随器**。
11. 共基极放大电路只有**电压放大作用**，电流放大系数接近于1，又称为**电流跟随器**。
12. 共射极放大电路的 R_e 可以减小温度对静态工作点的影响，有**负反馈**的作用。
13. 有关复合管（复习PPT上没有，但是去年考了）：首先要判断晶体管能否复合，方法是按照工作区的电流流向走一遍，如果电流没有冲突，那么是可以复合的；再需要判断晶体管的复合类型 PNP/NPN，方法十分简单，复合管的类型就是输入那一端的管子类型。

基本放大电路静态动态分析

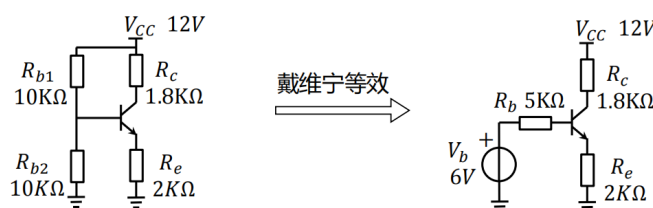
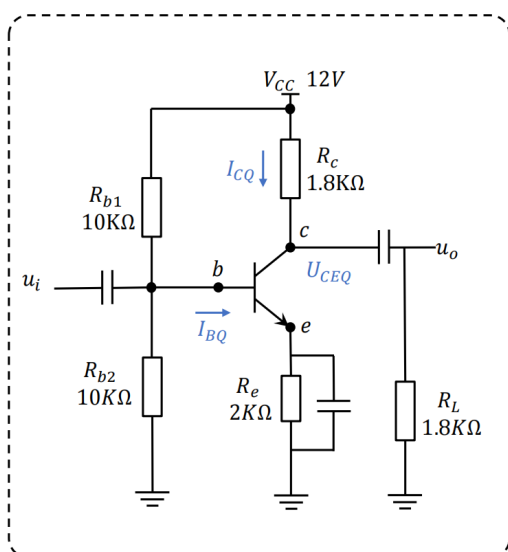
考试的重点是晶体管共射极放大电路，务必要掌握静态工作点、动态放大倍数、输入电阻、输出电阻四个特性的求解方法。

如何求静态工作点？

1. 静态工作点就是讨论直流情况，所以把所有电容看成断路，把所有电感看成短路，简化电路。
2. 结合晶体管的方程： $U_{BEQ} = 0.7V$ ， $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ 和基本的 KCL 回路公式连立求解。
3. 有时可以考虑戴维南定理等效之后简化电路，但是其实暴力列 KCL 也是一样可以求解的。

下面给出PPT上的例题，可以自己算一下。

4. 分析如下电路的静态工作点。已知晶体管 U_{BE} 导通压降为 $0.7V$ ，放大系数 $\beta = 100$ ，求 I_{BQ} ， U_{BQ} ， I_{EQ} ， I_{CQ} ， U_{CEQ} 。



静态工作点依次求解如下：

$$I_{BQ} = \frac{E_B - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{6 - 0.7}{5K + 101 \times 2K} = 25.6\mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 2.56mA$$

$$I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ} = 2.59mA$$

$$U_{CEQ} = E_C - I_{CQ}R_C - I_{EQ}R_E = 2.21V$$

理论上，计算完静态工作点之后我们必须判断晶体管是否跑在放大区，即是否有 $u_{CEQ} > 0.3V$ ，如果成立，那么可以接着算，如果不成立，那么可以先检查一下是不是算错了，不然的话这样无法做动态分析。

如何求动态放大系数？

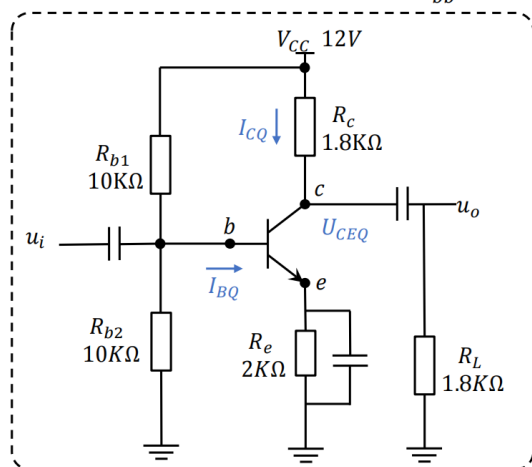
1. 动态工作下讨论交流情况，电容看成短路，电感看成断路。
2. 动态问题研究的是微小的电流变化的效应，因此 V_{CC} 和接地没有区别，因此可以把所有的地和 V_{CC} 整理到一起，简化电路。
3. 根据微变等效模型，把晶体管换成一个体电阻+一个受控电流源。

如何求输入电阻/输出电阻？

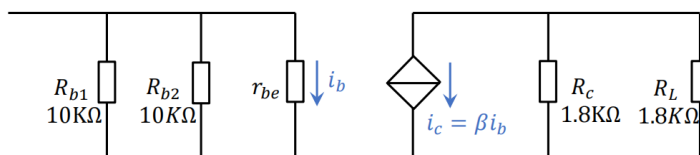
1. 输入电阻是从 u_i 看进去，直到 r_{be} （包含 r_{be} 本身），所有网络的等效电阻值。
2. 输出电阻是从 u_o 看进去，直到受控电流源两端，所有网络的等效电阻值。（注意 R_L 是负载电阻，不能算在输出电阻里！但是计算放大系数的时候还是要考虑负载电阻的）

仍然要关注PPT上这道例题。

4. 分析之前电路的动态参数，已知 $r_{bb'} = 10\Omega$ ，求放大系数 A_v ，输入电阻 r_i ，输出电阻 r_o 。



微变等效电路：



$$r_{be} = r_{bb'} + \frac{U_T}{I_{BQ}} = 10 + \frac{26\text{mV}}{25.6\mu\text{A}} = 1026\Omega$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta i_b (R_c || R_L)}{i_b r_{be}} = \frac{100 \times 0.9\text{K}}{1026} = -87.7$$

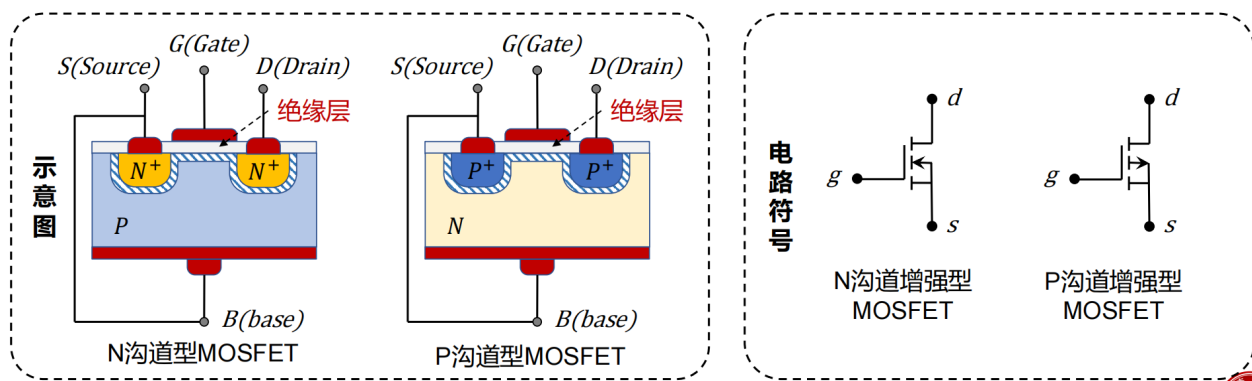
$$r_i = R_{B1} || R_{B2} || r_{be} = 851\Omega \quad r_o = R_c = 1.8\text{K}\Omega$$

【注意】 一个很容易错误的地方在于电流的方向，注意输出的电流是反向的，所以电压放大倍数是负的。

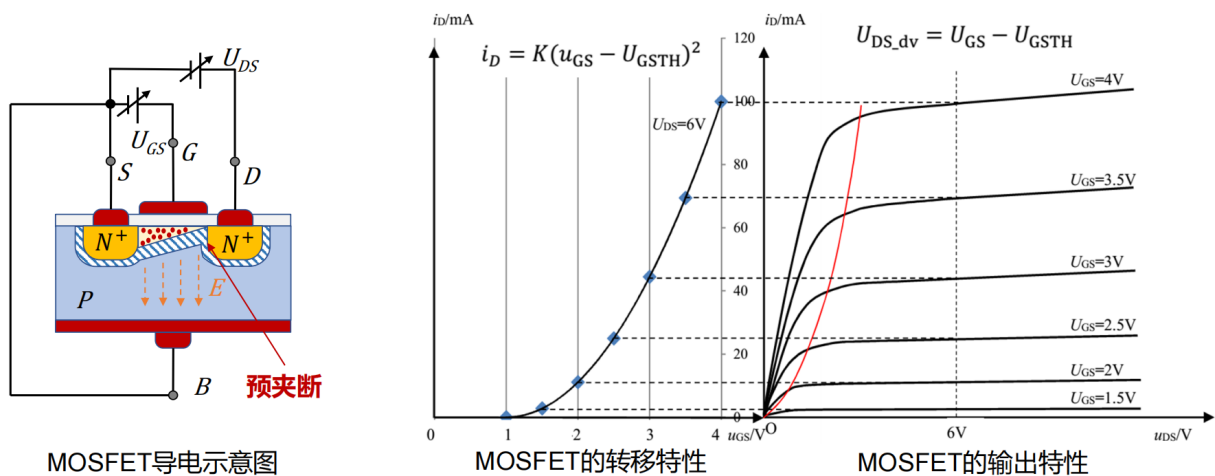
场效应管

场效应管放大电路不做定量考察，我们了解一些基本概念即可。

1. 与BJT采用两种载流子(多子和少子)同时参与导电不同，场效应管仅使用一种载流子参与导电，称为单极型器件。
2. 场效应管在G极与衬底之间施加电场，可以控制D极和S极的导通电流，是电压控制电流器件。
3. 场效应管具有3个端口：栅极(Gate), 漏极(Drain), 源极(Source)。
4. 增强型绝缘栅型场效应管(Metal-Oxide-Semiconductor FET, MOSFET)分为N沟道型和P沟道型，如下图。



5. N沟道增强型MOSFET工作在放大区时，耗尽层处于预夹断状态，此时 I_{DS} 几乎不变。
6. N沟道增强型MOSFET的转移特性和输出特性如下。
7. MOSFET的输出特性曲线分为：**可变电阻区**，**恒流区**，**截止区**。
8. 由于MOSFET为电压控制型器件，其组成的放大电路的**输入电阻非常高**。



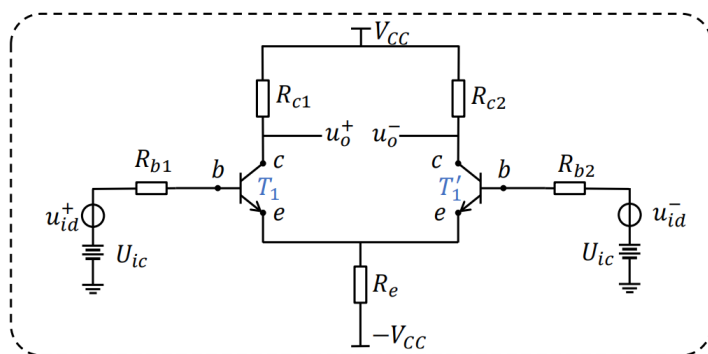
集成运算放大器

差分放大电路

由于温度变化，信号常常有一定幅度的漂移（温漂），而我们关注的是信号上搭载的微小变化信号的放大能力。因此我们要造出一种对共模信号强烈抑制，而对差模信号进行放大的电路。对于常见的多级放大电路，他们有以下问题：

1. 采用**阻容耦合**的多级放大电路可以避免温漂向后传递，但由于无法避免使用大电容，难以集成生产。
2. 采用**直接耦合**的多级放大电路**无法避免**温漂向后传递，使多级放大器的最终输出结果产生更大的漂移，输出范围变小，容易产生饱和失真或截止失真。
3. 单纯依靠 R_e 的负反馈作用抑制零漂，一是抑制作用有限，无法完全消除，二是根据推导的动态放大系数， R_e 的增大降低了放大性能，不好。

因此我们有了差分放大电路，他的核心原理是构造两个一模一样的电路，取两个输出的差值，这样如果有漂移，两个电路一起漂，互相抵消。当然，如果输入一样，输出都相等，差值必然是0，所以我们要给两边的电路输入的是一正一反一对差模信号。下图被称为长尾式差分放大电路。



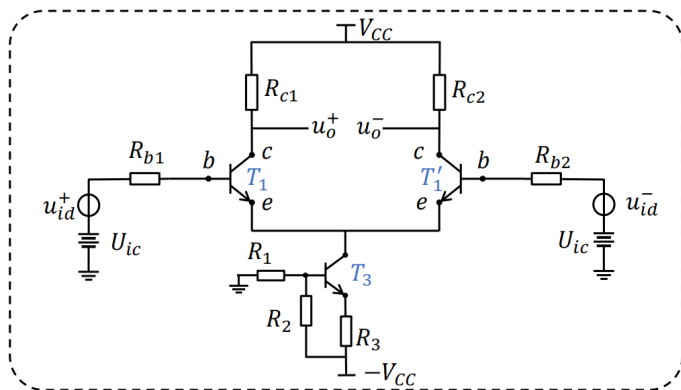
其中，输入信号可以分解为共模输入信号 u_{ic} ，差模输入信号 u_{id} 。

$$u_{ic} = \frac{u_i^+ + u_i^-}{2}$$

$$u_{id} = \frac{u_i^+ - u_i^-}{2}$$

差分电路的优点如下：

1. 当差分放大电路中对称器件的电气特性、温度特性一致时，差分放大电路可以显著抑制零点漂移、共模放大系数；可以显著提高差模放大系数。
2. 当差分放大电路中对称器件的电子特性、温度特性有差异时，晶体管的发射极偏置电阻 R_e 可以有效抑制零点漂移。
3. 两边输入差模信号时， R_e 两端在理想情况下电流方向一正一反，相互抵消，不影响放大倍数。
4. 随着 R_e 增大，差分放大电路的共模抑制比越大，即抑制温漂的能力就越强，因此可以采用恒流源代替发射极偏置电阻 R_e 。利用恒流源动态电阻极大的特性，提高差分电路的共模抑制比。



输入电阻： $R_i = 2(R_{b1} + r_{be1})$

输出电阻： $R_o = 2R_{c1}$

差模放大倍数： $A_d = \frac{\Delta u_{od}}{\Delta u_{id}} = -\frac{\beta(R_{c1} \parallel \frac{R_l}{2})}{R_{b1} + r_{be1}}$

共模放大倍数： $A_c = \frac{\Delta u_{oc}}{\Delta u_{ic}} = 0$

共模抑制比： $K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \infty$

镜像电流源

1. 利用集成电路可以制作电气特性一致的晶体管这一特性，可以制作出与参考电流相同或成比例关系的多组电流源。
2. 在集成电路中，镜像电流源为各级放大电路提供稳定的偏置电流（稳定静态工作点），或当作有源负载 R_e 。
3. 镜像电流源提供偏置电流时，采用PNP型晶体管；当作有源负载时，采用NPN型晶体管。三个典型电流源电路图如下。

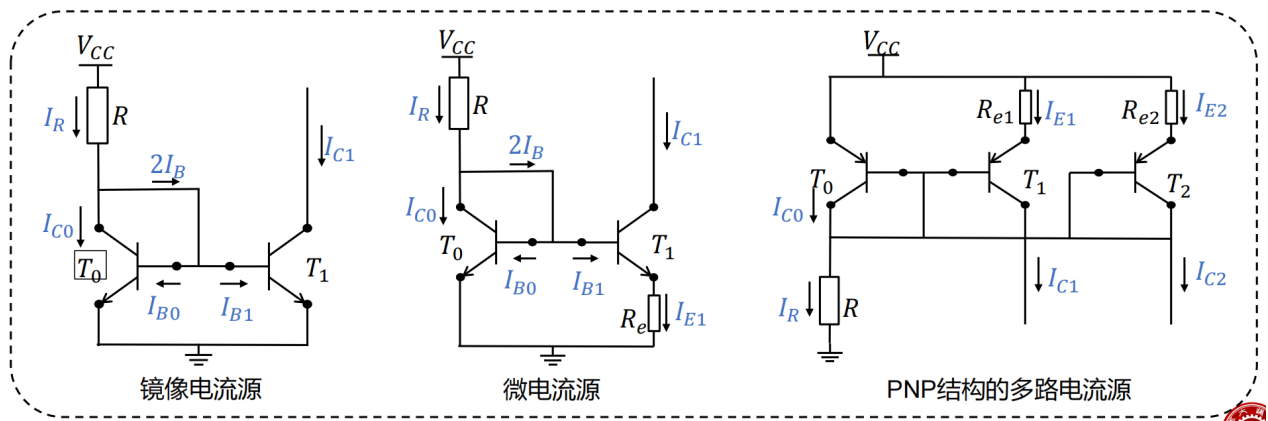


图1是最简单的镜像电流源，注意这张图左右两端对称， $I_{C0} = I_{C1}$ ，在这张图的基础上，在两个发射集和地之间接入两个大小不同的电阻，这样可以造出来比例镜像电流源；图2是为微电流源；图3为PNP结构的多路电流源，通过调节 R_{e1}, R_{e2} 可以调整每路的电流大小。

下面详细介绍微电流源的原理，比例电流源比较简单，这里略去。微电流源看图2，基极电压为 U_{BE0} ，因此 $I_{E1} = \frac{U_{BE0} - U_{BE1}}{R_e}$ ，由于在微电流源中两侧电流差异很大，因此不能使用 $U_{BE} = 0.7V$ 的简化模型，必须要从肖克利方程出发， $I_E = I_S \exp(U_{BE}/U_T)$ ，因此 $I_{E0} = I_S \exp(U_{BE0}/U_T)$ ； $I_{E1} = I_S \exp(U_{BE1}/U_T)$ ，故 $I_{E0}/I_{E1} = \exp(U_{BE0} - U_{BE1}/U_T)$ 。所以得到最终的方程： $U_{BE0} - U_{BE1} = U_T \ln(I_{E0}/I_{E1}) = I_{E1} R_e$ 。解此方程得到 I_{E1} ，近似就是 I_{C1} 。

功率放大电路

我们为何需要功率放大电路？之前的电路都是在静态工作点的范围内载上一个交流小信号，对此交流信号进行放大，然而这样直流分量会产生功耗，效率较低。因此我们试图造一个效率高的放大交流信号功率的电路，就是功放。

1. 晶体管共射极放大电路可以放大信号的电压与电流，因此具有功率放大能力，这类电路称为甲类放大器。由于晶体管始终处于放大区，效率较低。
2. 使用性能对称的NPN和PNP晶体管交替工作的功率放大电路，称为乙类放大器。优势是效率高，缺点是容易产生交越失真。

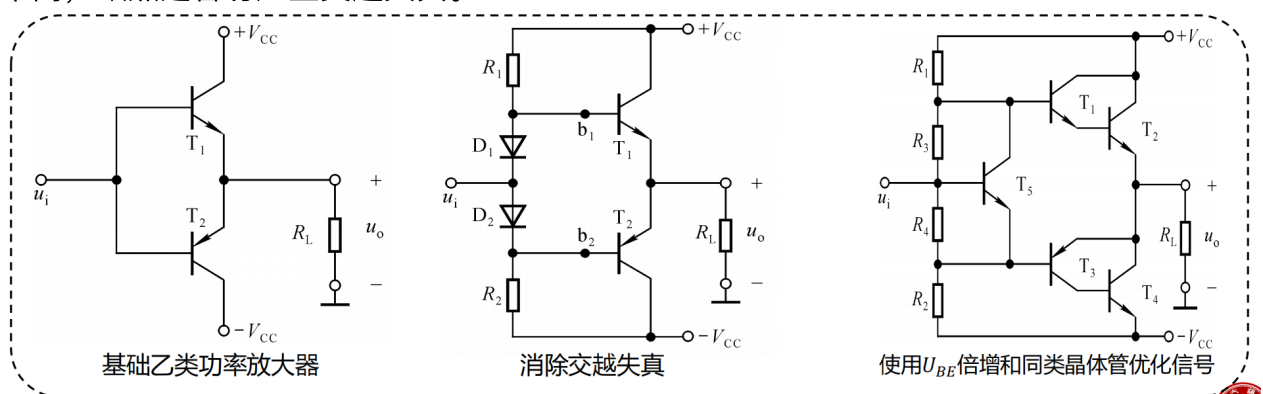
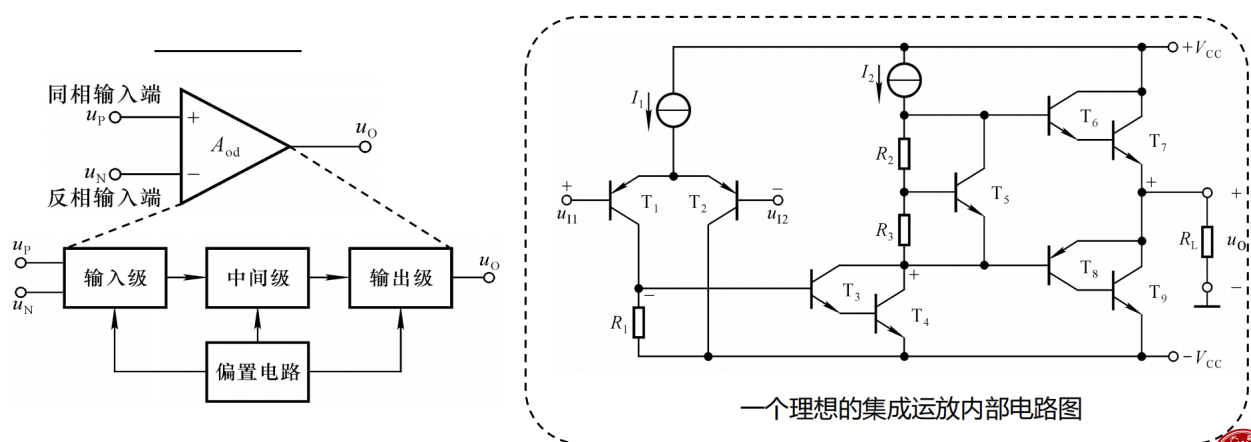


图1是最简单的乙类功率放大器，原理是输入为正时上面NPN晶体管导通，输入为负时下面PNP晶体管导通，这样实现了正、负全相的放大。然而这有一个问题，当电压处于 $-0.7V$ 至 $+0.7V$ 区间内，上下均不导通，输出信号为0。这种由于交流信号越变所产生的失真被称为交越失真。

如图2，现在我们想办法消除交越失真，我们希望 u_i 只要有一点正的信号，就要反映到 u_o 上，所以我们事先用两个二极管和两个分压电阻造出一个偏置电压，使得 T_1, T_2 恰好导通，再引入 u_i 。除了用二极管的方法，还可以通过一个晶体管来产生偏置电压，如图3， T_5 的作用并不是放大，二是利用 U_{BE} 产生偏置电压， $U_{B_1B_2} = \frac{R_3+R_4}{R_4}U_{BE}$ ，把这个电压和右边晶体管的导通电压对齐即可；这个设计显然比图2更好，因为此时压降是可以通过调节电阻精准调节的，而不是由两个二极管压降确定。此外，为了得到更大的放大倍数，右边的晶体管都采用了复合管结构。这样消除交越失真的放大电路也叫甲乙类功放。

集成运放

1. 集成运算放大器是一种采用直接耦合的多级放大电路，具有如下特点：利用一致性好的差分放大电路作为输入级，利用电流源电路提供稳定的偏置电流和替换无源器件，利用功率放大电路作为最后一级输出级，利用复合管改善晶体管电气特性。
2. 集成运放的放大倍数极大，在 10^5 以上。



我们分析一下集成运放的四个组件：输入级、中间级、输出级、偏置电路。

1. 偏置电路：为各级放大电路设置合适的静态工作点，采用电流源电路。比如在差分放大电路中用电流源代替 R_e ，提供稳定的大电阻，并且设置合适的静态工作点。
2. 输入级：前置级，多采用双端输入单端输出的差分放大电路。要求 R_i 大， A_d 大， A_c 小（即要把输入的共模信号狠狠抑制，放大其中的差模信号），输入端耐压高。
3. 中间级：主放大级，多采用共射放大电路，使用复合管以提高放大倍数。要求有足够的放大能力。
4. 输出级：功率级，多采用准互补输出级。要求 R_o 小，最大不失真输出电压尽可能大。

看右边的电路图，要把它拆开来看，左边是输入级差分放大电路，中间下面是中间极，中间上面和右边是功率放大电路，都是已经学过的电路结构的组装，十分清楚。

半导体应用

信号运算

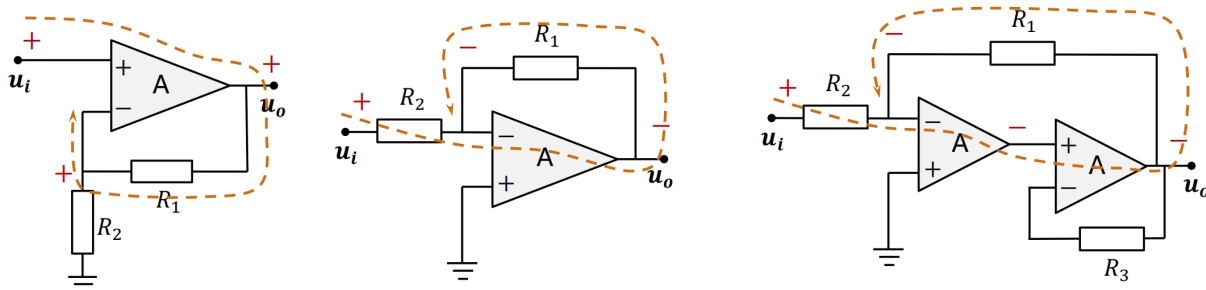
反馈理论

本节的重要考点在于判断反馈类型：电压/电流，串联/并联，正/负反馈。

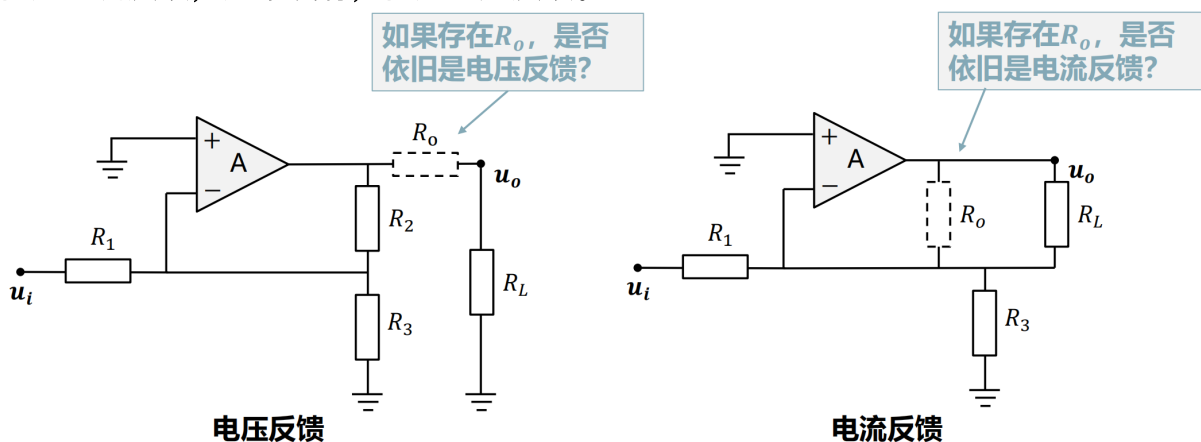
判断正负反馈的方法是，给输入一个小的信号扰动（假设为正），然后顺着电路走，最后绕回输入端，如果反馈的信号为正则是正反馈，如果反馈信号是负则是负反馈。信号传递的时候有以下几点判断原则：

1. 对于运放，输出 $= \beta(u_+ - u_-)$ ，因此 + 端有正的扰动，输出扰动是正的，- 端有正的扰动，输出是负的。
2. 电阻相连的两端一般是同正同负变化的，但是也得看情况，有参考电位。
3. 有晶体管的情况要先把电压的扰动转化成电流的扰动，再结合一些参考电位（如 V_{cc} 或接地）把电流扰动转回电压扰动。

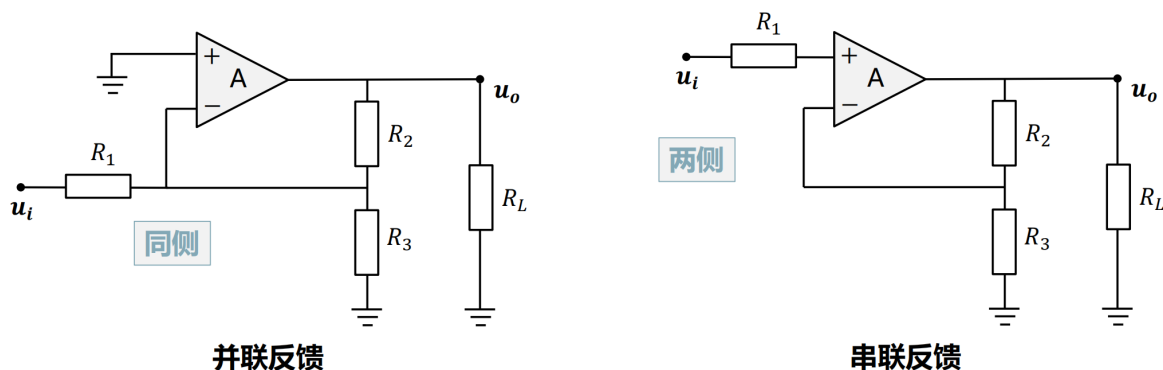
下面这几个例子用来判断正负反馈，可以自己过一下。



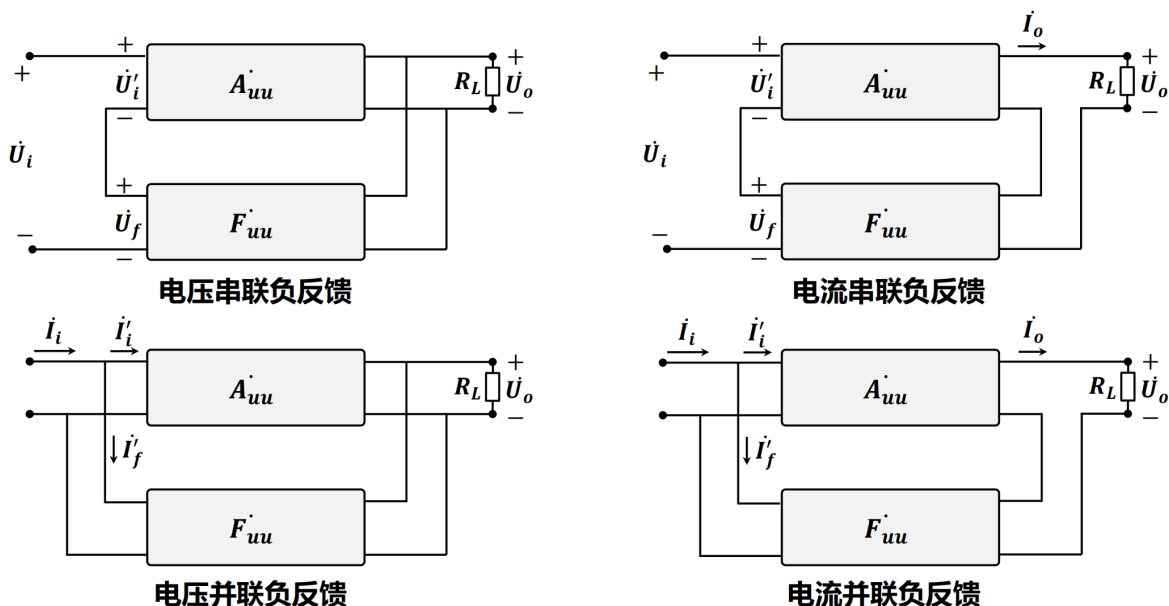
电压/电流反馈的含义是：为了得到稳定的输出电压（造一个电压源）的反馈是电压反馈，为了得到稳定的输出电流（造一个电流源）的反馈是电流反馈。但是这显然不容易判断，所以有如下判断电压/电流反馈的技巧：把输出直接短接到地上，观察此时是否还有反馈，如果有，那么就是电流反馈，如果没有，就是电压反馈。



串联/并联反馈的定义：在输入端，输入量、反馈量和净输入量以电压的方式叠加为串联反馈；以电流的方式叠加为并联反馈。判断串联/并联反馈的方法是，对于运放，输入端和反馈端在同一侧，就是并联反馈，输入端和反馈端在两侧，就是串联反馈。【最容易判断的一个】



总结起来，就是这张图，感觉可能考选择：

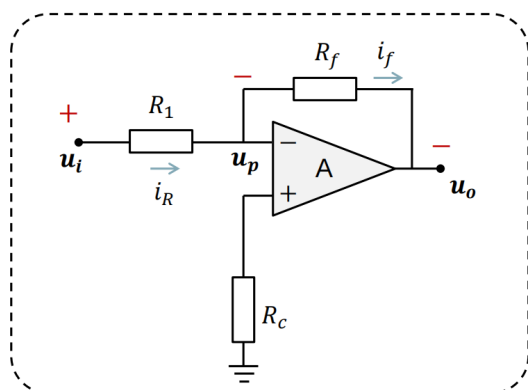


运算电路

在负反馈电路中，如果前向放大系数非常大，则电路进入**深度负反馈**，系统放大倍数仅取决于反馈回路。这是很有趣的性质，虽然前面我们推出了输出 $= \beta(u_+ - u_-)$ ，但是这个 β 在实际电路中并没有用，因为开环增益极大，系统进入深度负反馈，放大倍数仅与反馈网络有关。

深度负反馈下，运放满足**虚短**、**虚断**两条基本性质，解题时这两点及其重要，再结合基尔霍夫定律就可以很轻松算出放大倍数。**虚短**是指运放的两个输入端电势基本相等，看起来如同短接了；**虚断**是指运放的两个端口几乎无输入电流，看起来像断路了。

最简单的例子是反向比例放大器，推导如下：



由于电路工作在深度负反馈状态，故运放输入端口满足虚短、虚断。

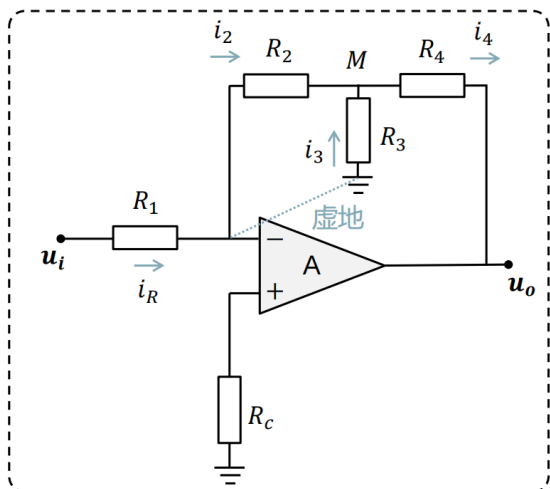
由于输入端口满足虚断，故 $i_R = i_f$

由于输入端口满足虚短，故 $u_p = 0$

$$i_R = \frac{u_i - u_p}{R_1} = \frac{u_i}{R_1} \quad i_f = \frac{u_p - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

$$\text{可得: } u_o = -i_f R_f = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

在反向比例运算电路中，如果需要较高的放大系数，则要求反馈电阻的组织非常大才可以做到，但这种做法会使输出信号不稳定。一种改进方法是将反馈电阻替换为T型电路结构，可以在不使用大电阻的前提下，有效提高电路的放大倍数，如下图。



$$i_2 = \frac{u_i}{R_1} \quad u_M = -\frac{R_2}{R_1} u_i$$

$$i_3 = \frac{-u_M}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} u_i$$

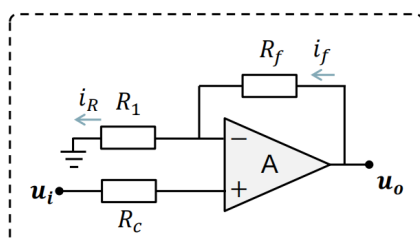
$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{R_3 + R_2}{R_1 R_3} u_i$$

$$u_o = -i_4(R_4 + R_2 \parallel R_3)$$

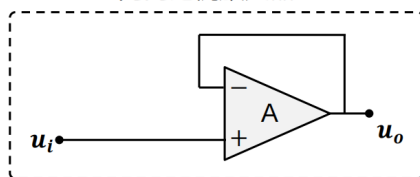
$$= -\frac{R_3 + R_2}{R_1 R_3} (R_4 + R_2 \parallel R_3) u_i$$

使用 \$R_2\$ 从 \$R_3\$ 处撬动了更大的电流，从而减小电阻阻值

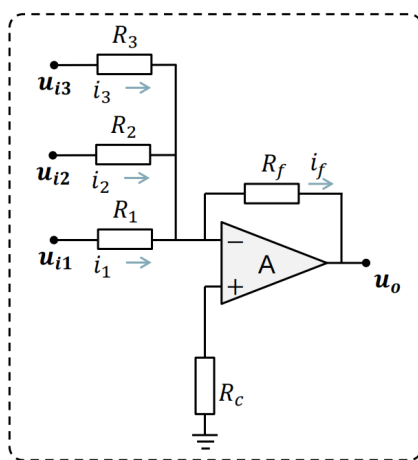
这个题图中比较迷惑，这个虚地的意思不是说运放的输入端一定相当于接地。在这个题目中，运放的负端电位等于正端，而正端接一个电阻，再接地，根据虚断的原则，\$R_c\$ 上没有电流，运放的正端电位就是0，因此这个题中运放的负端相当于接地。



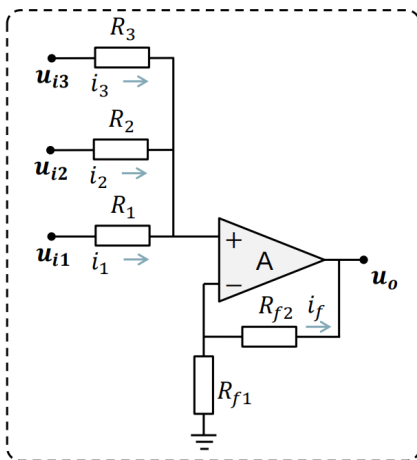
同向比例放大器



电压跟随器



反向加法电路



同向加法电路

上面这几种放大电路/加法电路的计算都可以自己练一下，我这里给出一些解答过程，可供参考。

1. 同向比例放大器：

$$\text{虚短、虚断：} u_+ = u_- = u_i, \text{ KCL：} \frac{u_o - u_-}{R_f} = \frac{u_- - 0}{R_1}$$

得到结果：

$$u_o/u_i = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

2. 反向加法电路：

$$\text{虚短、虚断：} u_+ = u_- = 0, \text{ KCL：} i_f = i_1 + i_2 + i_3 = \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}; u_o = -i_f R_f$$

得到结果：

$$u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$$

3. 同向加法电路：

虚断： $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ；虚短： $u_+ = u_-$

$$KCL: u_o = -i_f(R_{f1} + R_{f2}); u_- = -i_f R_{f1}; i_k = \frac{u_{ik} - u_+}{R_k}, k = 1, 2, 3$$

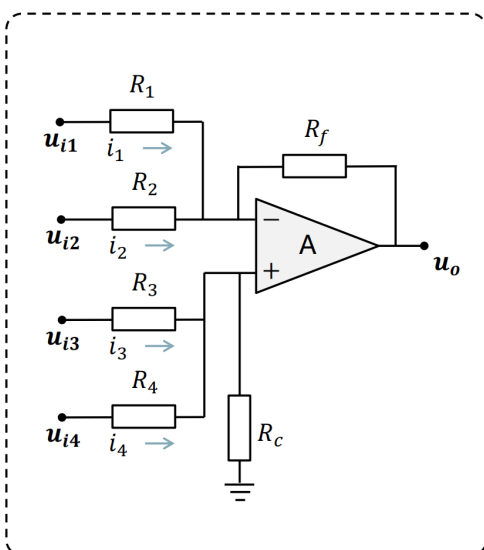
联立以上所有，得到结果：

$$u_o = (1 + \frac{R_{f1}}{R_{f2}})(R_1 || R_2 || R_3) \sum_{i=1}^3 \frac{u_{ik}}{R_k}$$

4. 电压跟随器，输入电压等于输出电压，输入阻抗高，输出阻抗低。

有了各种加法，当然也可以有加减混合运算，这是作业题，过程如下（用叠加原理做也可）。

加减混合电路



设 $R_1 || R_2 || R_f = R_3 || R_4 || R_c = R_p$

同向输入产生的输出

$$u_{o1} = R_f(\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4})$$

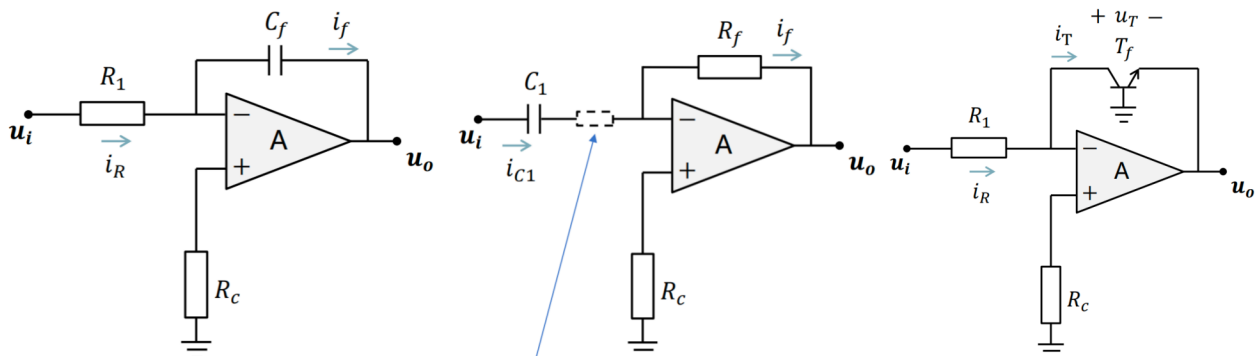
反向输入产生的输出

$$u_{o2} = -R_f(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2})$$

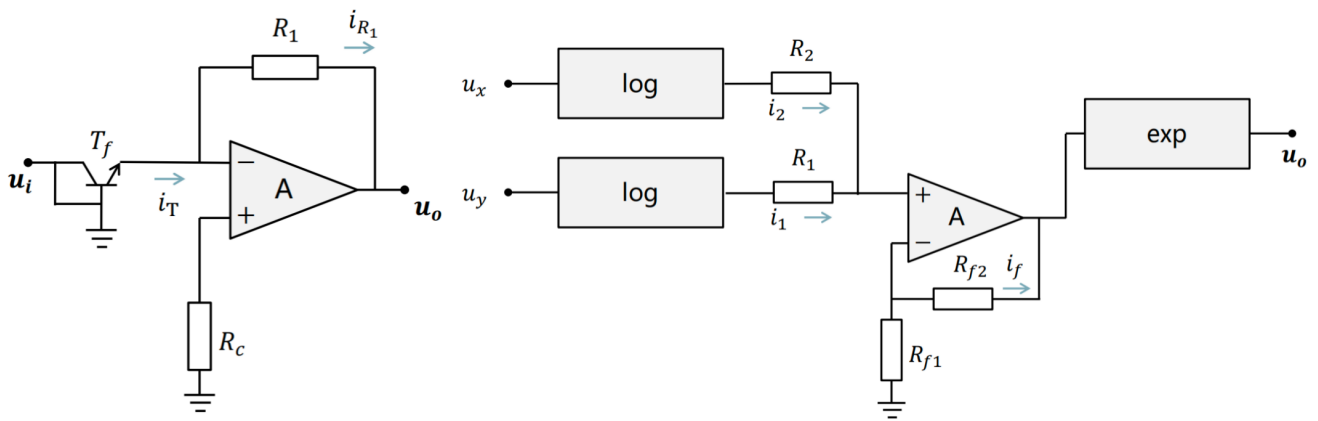
通过叠加原理得到最终输出

$$u_o = R_f(\frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4} - \frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_2})$$

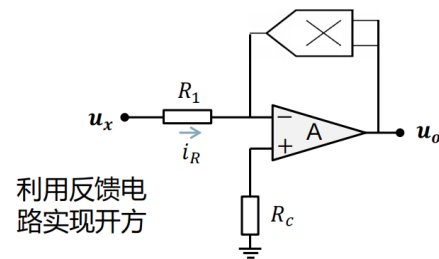
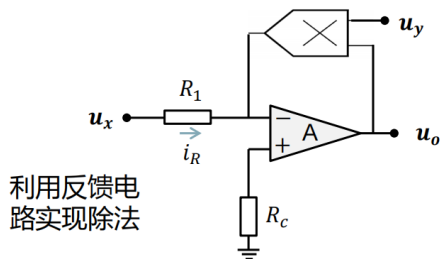
下面就是一些非线性运算了，首先是积分和微分电路（第1、2张图）。积分电路中输出电压是输入电流在电容上的累积电压，从而实现积分；微分电路中输出电压是输出电流乘以电阻，而输出电流是输入电压在电容上的电流，是输入电压的微分。微分电路中输入端是一个限流电阻。第3张图是对数运算，这利用了晶体管的伏安特性。



下面的左图是指数运算电路，原理还是晶体管的伏安特性。下面的右图是乘法电路，思路是乘法=取对数+加法+取指数，简单易懂。



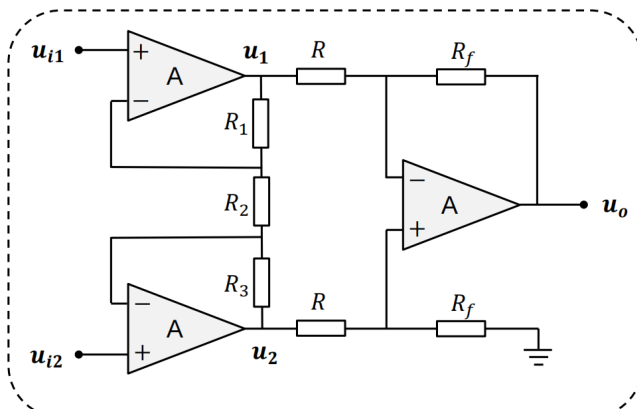
有了乘法电路，我们可以把乘法电路放到反馈网络得到除法和开方电路。



信号调理

仪表运放

1. 仪表运放的优点：输入阻抗很大、共模抑制能力强、差模放大倍数大、增益调节方便。
2. 仪表运放的电路图如下（记住，去年考察），放大倍数的计算如下。计算过程中只需要牢记虚短、续断两个原则（虚短是运放的两个输入端电位相等，续断是运放的两个输入端没有电流流入），再根据基尔霍夫定律列式子即可。



计算左图放大倍数：

$$u_{R2} = u_{i1} - u_{i2} \quad u_1 - u_2 = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} (u_{i1} - u_{i2})$$

由叠加原理，得

$$u_{o1} = -\frac{R_f}{R} u_1$$

$$\frac{R_f}{R + R_f} u_2 = \frac{R}{R + R_f} u_{o2} \quad u_{o2} = \frac{R_f}{R} u_2$$

$$u_o = u_{o1} + u_{o2} = -\frac{R_f (R_1 + R_2 + R_3)}{R} (u_{i1} - u_{i2})$$

滤波电路

1. 滤波电路是对于输入信号有选择的放大输出的电路。
2. 滤波电路按照处理方式可分为：模拟滤波器、数字滤波器；按照是否存在有源器件可分为：有源滤波（电阻电容电感+晶体管/运放）、无源滤波（只有电阻电容电感）；按照滤波频率效果可分为：低通滤波、高通滤波、带通滤波（中间通）、带阻滤波（中间阻断、两边通）。

3. 截止频率，就是振幅下降为峰值 $1/\sqrt{2}$ 的位置，相当于下降 3dB。

低通

高通

带通

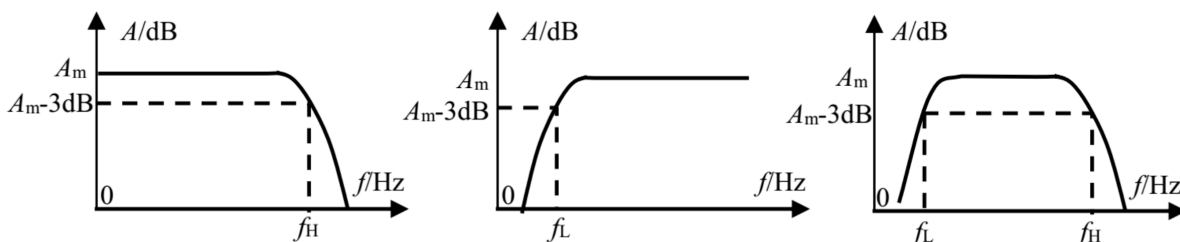


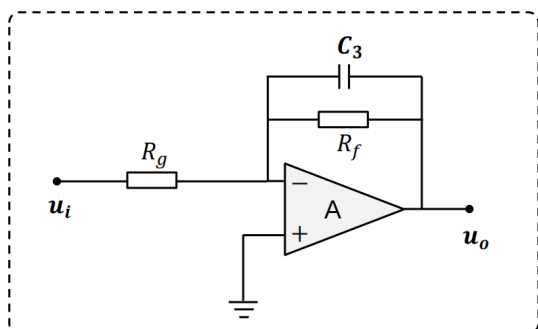
图 Section25-5 图解上限、下限截止频率

$$|\dot{A}|_{f=f_H} = A_m \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707 A_m$$

$$|\dot{A}|_{f=f_L} = A_m \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707 A_m$$

4. 一阶滤波器要掌握计算，示例如下：

4. 有源一阶低通滤波器的电路如下，计算其电压增益 A_{uf} 、截止频率 f_h 。



$$A_{uf} = - \frac{R_f \parallel \frac{1}{j\omega C_3}}{R_g} = - \frac{\frac{R_f \times \frac{1}{j\omega C_3}}{R_f + \frac{1}{j\omega C_3}}}{R_g} = - \frac{R_f}{R_g} \times \frac{\frac{1}{j\omega C_3}}{R_f + \frac{1}{j\omega C_3}}$$

$$= - \frac{R_f}{R_g} \times \frac{1}{1 + j\omega R_f C_3}$$

$$\text{截止频率 } f_h \text{ 为: } f_h = \frac{1}{2\pi R_f C_3}$$

这些运算其实十分简单，只是在常规的运算电路上考虑了电感和电容。把电感看成阻抗为 $j\omega L$ 的电阻，电容看成阻抗为 $\frac{1}{j\omega C}$ 的电阻，然后根据虚短、虚断、基尔霍夫定律列式子即可。我们首先算到了 A_u ，然后把它拆开：

$$A_u = K \times \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \times \frac{j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

这样得到中频增益就是 K ，上限截止频率 $\frac{1}{2\pi R_1 C_1}$ ，下限截止频率 $\frac{1}{2\pi R_2 C_2}$ 。这一类的题目很容易出一些变种考察，原始PPT上有诸多示例，可以一个一个算一下：一阶同向/反向+高通/低通有源滤波器，一阶全通相位提前/滞后滤波器……

5. 二阶滤波器不考计算，只需要背过：

1. 二阶有源滤波器采用LC电路组成，导通区域外下降速度更陡峭，每10倍频程下降 **40dB**。
2. 二阶有源滤波器在特征频率处增益取决于品质因数。二阶低通有源滤波器根据此处的增益，可以分为：**巴特沃斯滤波器 ($Q=0.707$)**，**贝塞尔滤波器 ($Q<0.707$)**，**切比雪夫滤波器 ($Q>0.707$)**。

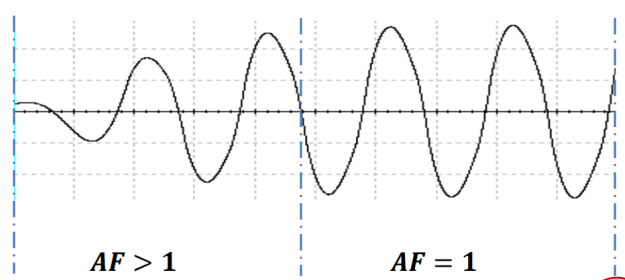
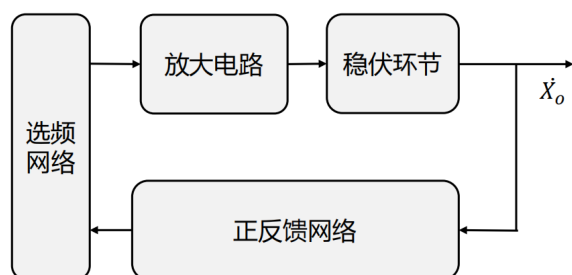
信号产生

信号产生网络概述

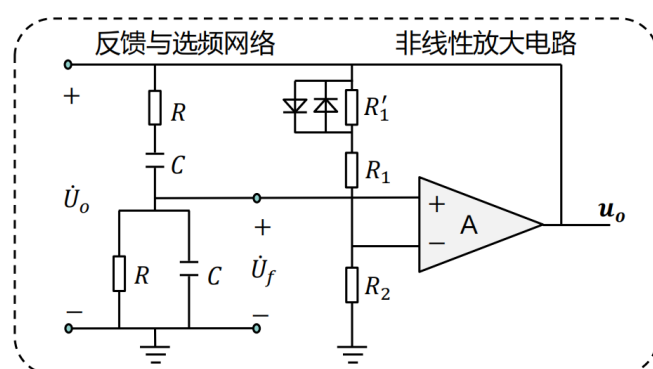
信号产生的目的是得到某一特定频率的正弦信号，我们的思路如下：首先一个回路里即使没有电源，也是有一些噪声小信号的，我们设法造出一个针对特定频率的正反馈电路，使得特定频

率的信号不断放大，而其他频率相对被抑制，这样最后我们就得到了特定频率的正弦信号。具体实现有以下三点细节需要记忆：

1. 自激振荡的平衡条件：幅度平衡条件， **$AF=1$** ；相位平衡条件，反馈后的相位满足 **2π 整数倍**。
2. 自激振荡的电路实现由以下4部分构成：**放大电路，稳伏环节，正反馈网络，选频网络**。
3. 自激振荡建立初期，信号比较小，需要满足 **$AF>1$** ，使选定频率的信号可以逐步放大。当振荡稳定时，需要改变A、F的取值，使其满足振荡平衡条件 **$AF=1$** ，避免信号被无限放大。因此我们需要一个**非线性放大环节**。



正弦信号产生网络



$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R \parallel \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + (R \parallel \frac{1}{j\omega C})} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

$$\text{令: } f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{得: } \dot{F} = \frac{1}{3 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$$

当 $f = f_0$ 时，不但输入输出电压同相位，
且 $|\dot{F}|$ 最大，为 $1/3$

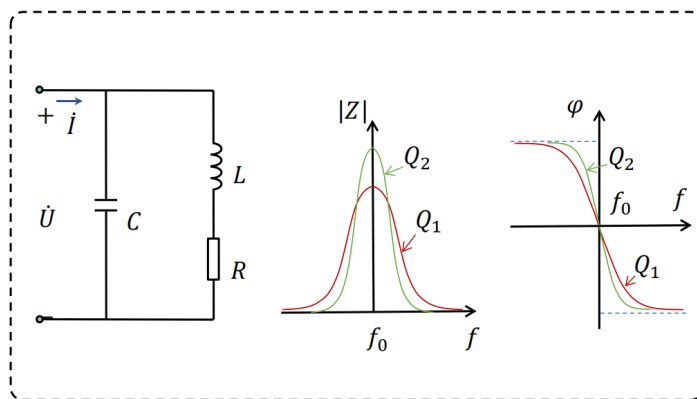
上图给出了一个基于RC选频的正弦信号产生网络。这个电路图拆成左右两部分看，左边是**文氏桥选频网络**（重要，记住电路图，去年考了；选频的原理如图），右侧是**放大网络**（一个同向比例运算电路），最终输出的线拉回左侧输入端，作为正反馈信号。而稳伏（非线性放大）的部分由两个二极管承担。

我们分析一下二极管的作用，同向比例放大电路的放大倍数是：

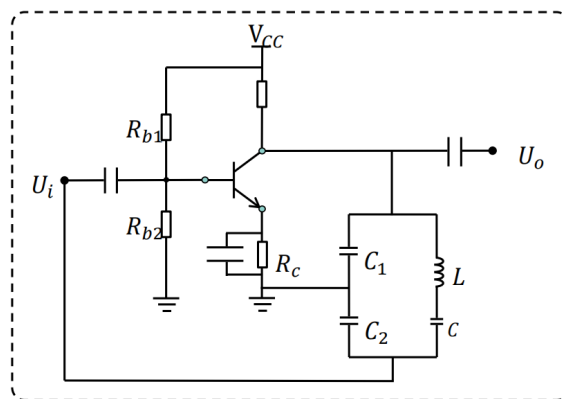
$$A = \frac{R_2 + R_1 + R'_1}{R_2}$$

当输出信号较小时，二极管不通， R'_1 正常发挥作用；当输出信号较大时，二极管导通，相当于 R'_1 为0，那么此时放大倍数就变小了，我们可以适当选择 R'_1 的大小，使得没有 R'_1 时 $AF=1$ ，就满足了振荡平衡条件。（除此之外，还可以采用热敏电阻来替换 R_1 或 R_2 ，使输出电压增大时，放大系数缩小，从而满足振荡电路的非线性条件。）

文氏桥选频网络是基于RC振荡做的，一般选频比较小（1MHz以下），而基于LC振荡的选频网络的频率可以做的更高。LC选频网络具有二阶特性，在谐振频率处具有更高的放大倍数，相位变化也更加陡峭。



LC并联谐振选频网络



电容三点式振荡电路

LC并联选频网络如左图所示，这里需要知道品质因数Q的意义：

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$$

Q越大，尖峰越陡峭。

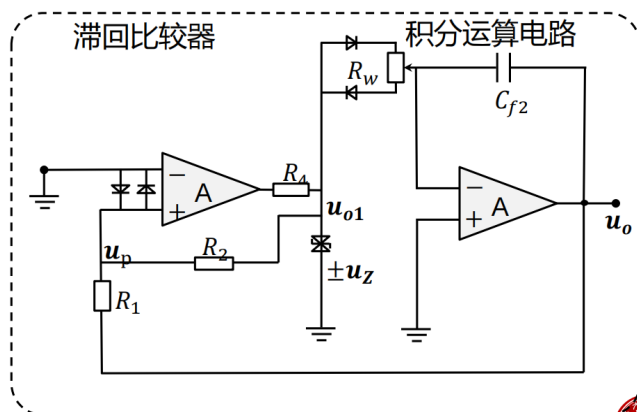
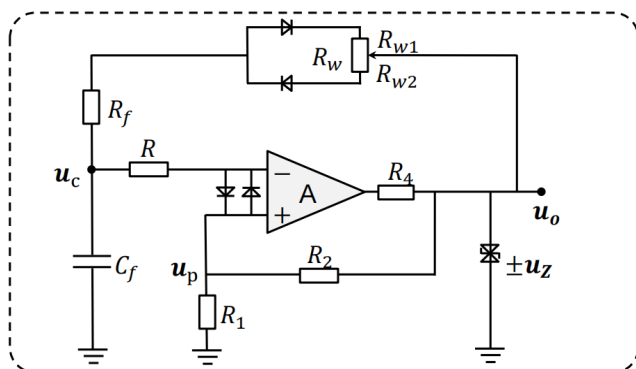
电容三点式振荡电路是一个基于LC选频的信号产生电路。放大电路是晶体管共射极放大电路，起到选频作用的是一个LC并联网路（替代掉 R_e ，当频率等于特征频率时，LC并联的阻抗急剧增大，导致输出电位显著增大）。

一个巧妙的设计在于这个电路的反馈网络，如果直接从 U_o 拉一条线回到输入，那么这是一个负反馈（前面分析过），这不好。这里采用的办法是把电容拆开， C_1 和 C_2 的中间接地。这样，输入电压升高时，输出电压减小， C_1 上的压降减小， C_2 上的压降减小，由于 C_2 的上极板接地，所以 C_2 的下极板电压升高，把这个电压信号拉回到输入端作为正反馈。

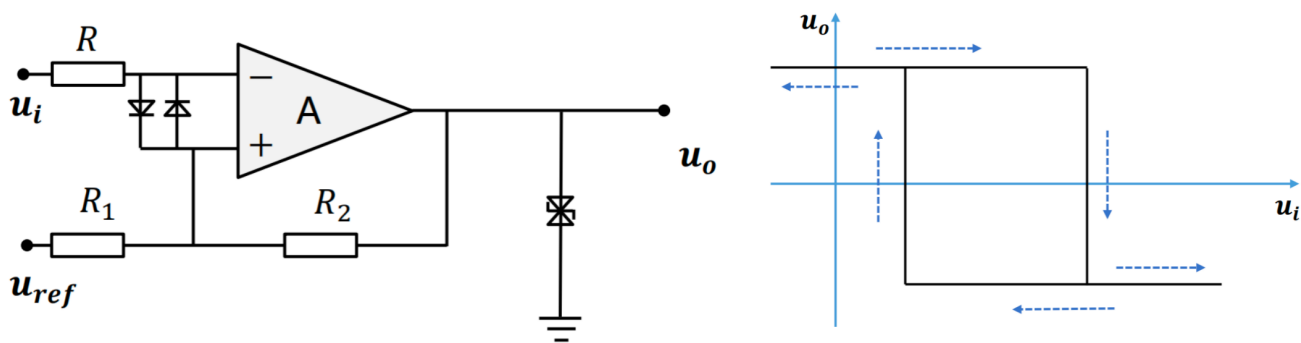
在实际使用电容三点式电路时，常使用石英晶体替代电容三点式电路中的电感器件，可以得到电气特性好、温漂极小的时钟产生电路。常用于钟表、数字电路的时钟等场合。

非正弦信号产生网络

常见的非正弦波振荡电路有：矩形波，占空比可调的矩形波，三角波，锯齿波等。这四个信号有对应关系，矩形波积分就是三角波，占空比可调的矩形波就是锯齿波。因此从网络设计上，他们只差一个积分网络。



左图是占空比可调的矩形波的产生网络，右侧是锯齿波的产生网络。这些网络都需要一个滞回比较器来产生矩形波。滞回比较器的原理如下：



我们首先考虑 u_i 从负无穷逐渐增大的过程，初始状态 u_o 电位为正（记为 u_c ）， $u_+ = u_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}(u_c - u_{ref})$ ，只有当 $u_i > u_+$ 时， u_o 反转，此后电位一直是负；而我们考虑 u_i 从正无穷慢慢减小的过程，初始状态 u_o 电位为负， $u_+ = u_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}(-u_c - u_{ref})$ ，只有当 $u_i < u_+$ 时， u_o 反转，此后电位一直是正。两个电位翻转位置的不同，导致形成了这样的滞回线。

有了滞回比较器，我们用一个RC低通滤波器作为输入，通过输出直接拉到输入端的方式作为负反馈。右侧的两个二极管+可变电阻用来调节锯齿波的形状，使得充电和放电时时间常数 $\tau = RC$ 不同。这样可以得到占空比可调的矩形波。在这个基础上加入积分电路，得到锯齿波产生电路；同时为了克服积分电路的漂移现象，从三角波的输出引入反馈网络直接到矩形波输入。

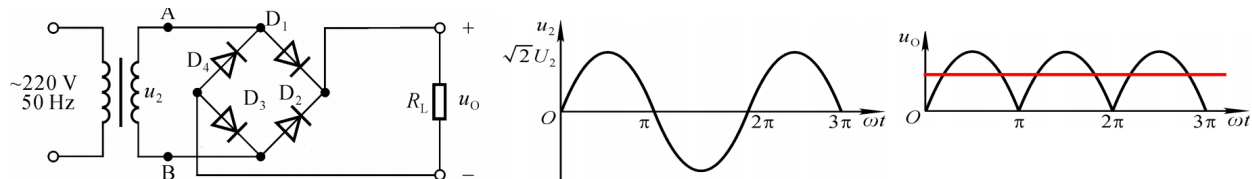
电源

电源的作用是，输入一个50Hz 220V的交流电压，输出指定电压的直流电。（比如实验室常用的可调稳压电源，可以输出0-30V的稳压直流电）这一章介绍线性电源和开关电源，重点掌握线性电源。

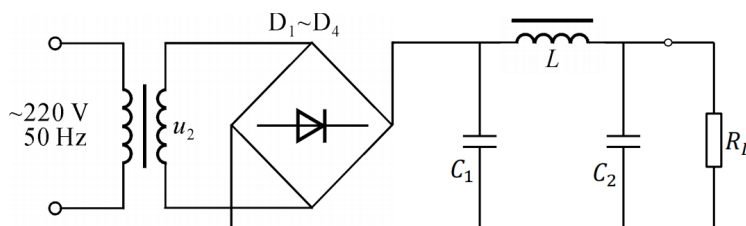
线性电源

线性电源由变压器、整流电路、滤波电路、稳压电路构成。

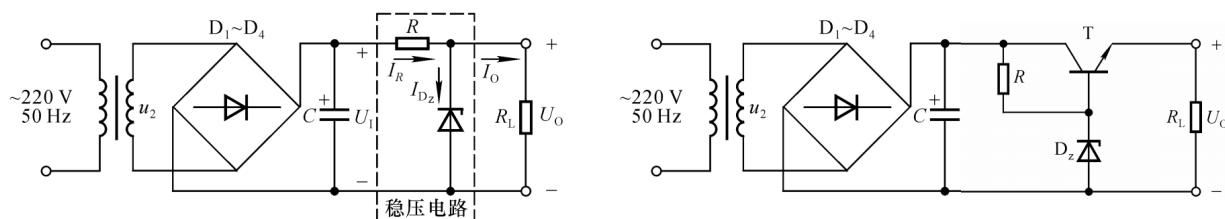
1. 变压器的作用是把高压交流电变为低压交流电，这一步能量转换效率通常较高（99%）；
2. 整流电路要把交流电变为脉动的直流电，分为全波整流和半波整流，常用的是下图的单相桥式整流电路。直流电压为0.9倍的交流有效电压。



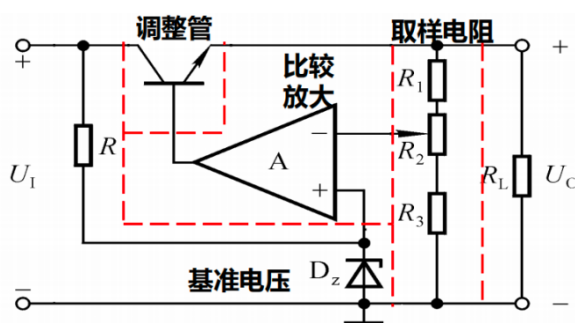
3. 滤波电路的作用是把整流后的直流电做初步的平滑。有电容滤波和电感滤波两种。当负载较小时，电容滤波的效果较好；当负载较大时，电感滤波的效果较好。为了适应可变的负载，采用 π 型滤波电路可以融合二者的优势。



4. 稳压电路的作用是消除滤波之后的纹波，得到稳恒的直流输出。一个常见的思路是直接用稳压二极管（如左图），但是这样稳压电路上的电流可能不易控制。因此我们给出了一个利用共射放大电路的稳压电路，这样主要的电流从集电极流向发射极，而进入基极（流到稳压二极管）的电流极少。



5. 带负反馈的稳压电路。之前利用共射放大电路的稳压电路的问题在于输出电压难以调节，或者调节后效率较低。设计的使用负反馈的稳压电路原理如下图，基准电压起到提供电压基准的作用，通过调整取样电阻两边的阻值调整输出电压。晶体管的压降可以随着输入电压和负载变化以稳定输出，故称为调整管。运放起到负反馈的作用，同时工作在深度负反馈的状态下，可以保证同向端和反向端电压相等。

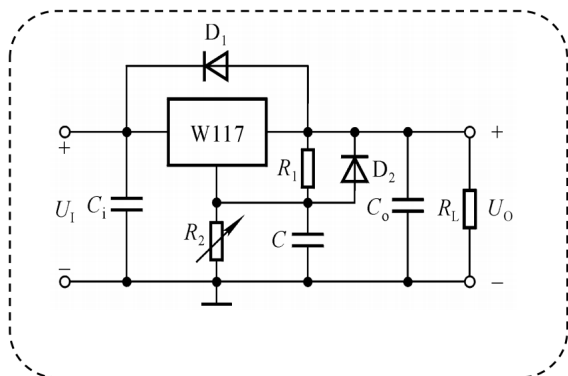


集成稳压器

1. 将串联型稳压电路使用集成电路实现，暴露出参考电压调节端口，可以组成输出电压可调的线性直流电源。
2. 集成稳压器可以使用反向二极管进行保护，防止掉电时内部电路烧毁。（图中的二极管的作用就是保护电路，防止突然掉电时烧毁）

复习PPT中出现了一道神秘计算题，似乎上课和作业并没有讲过。这道题看着抽象，实际极其简单，二极管和电容都不看，实际上就是 R_1, R_2 两个串联分压。 R_1 两端的电压是固定的，就是所谓的参考电压。最后结合最简单的初中电路知识就可以算出可调电阻的取值和稳压器的功耗。

3. 如下列电路图所示，已知W117的参考电压为1.25V，欲使用W117集成稳压器搭建3.3V直流电源。选定输入电压为5V， R_1 为10K Ω ， R_L 为51 Ω ，求分压电阻 R_2 的取值，W117的功耗。



根据反馈网络的分压电阻，可得：
$$\frac{U_o}{R_1 + R_2} = \frac{U_{ref}}{R_1}$$

整理后，可得：
$$R_2 = \frac{U_{ref}}{U_o - U_{ref}} R_1 = 0.61 R_1 = 6.1 K\Omega$$

接下来可以求W117的输出端电流 I_W ：

$$I_W = \frac{U_o}{R_L \parallel (R_1 + R_2)} = \frac{3.3}{0.051 \parallel 16.1} mA = 64.9 mA$$

功耗为：
$$P_W = (U_i - U_o) I_W = 1.7 \times 64.9 mW = 110 mW$$

开关电源

据说开关电源并不作考试要求，这里搬运一下复习PPT。

1. 线性电源的效率一般为**20%到50%**，无法应用于大功率场景。开关电源的效率可以达到**95%**，适合对供电效率要求较高的场合。
2. 开关电源通过脉宽调制等技术将直流电源切分成按照一定比例通断的方波，然后通过滤波和稳压电路输出稳定的直流信号。
3. 由于滤波和稳压电路与线性电源相同，在使用集成芯片的开关电源时，二者的分压负反馈方法也是一样的。
4. 通过合理使用电阻和电感，可以搭出**降压、升压或反压**的电路。

