

### 第三章 例题

**例 3-1** 设某高频功率放大器的基极回路及晶体管理想化转移特性如图 P3-1 所示。已知： $u_i = 1.5 \cos \omega t$  /V。试在转移特性上画出输入电压和集电极电流波形，并求出  $I_{c0}$ 、 $I_{c1}$  的大小，说明不失真输出时输出回路应如何设计？

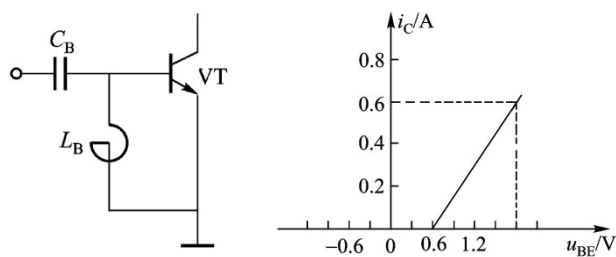


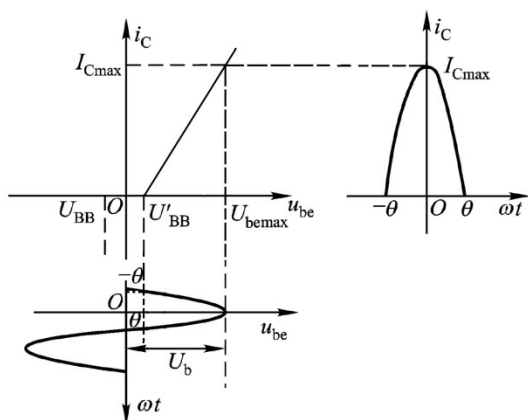
图 P3-1

**题意分析：**本题是高频功率放大器分析的基本题。由图可以知道，此时基极偏置为零偏，基极与发射极之间所加的信号即为输入信号。根据转移特性，可以知道  $U_{BB} < U_{BB\Box}$ ，集电极电流导通角  $\theta < 90^\circ$ ，集电极电流波形为小于半个周期的脉冲，为了输出电压不失真，输出回路应采用谐振回路，谐振回路的谐振频率为输入信号的频率，这样可以不失真的放大信号。

**解：**根据题意，有

$$u_{BE} = 1.5 \cos \omega t \quad V$$

输入电压和集电极电流波形如图所示。



由图可知

$$I_{C\max} = 0.6A$$

$$U_{BB} = 0.6V$$

$$U_{BB} = 0V$$

$$U_b = 1.5V$$

$$\text{则 } \cos \theta = \frac{0.6}{1.5} = 0.4$$

查表有  $\theta = 66^\circ$

$$\alpha_0(66^\circ) = 0.239$$

$$\alpha_1(66^\circ) = 0.419$$

所以

$$I_{c0} = \alpha_0(66^\circ) I_{C\max} = 0.239 \times 0.6 = 0.1434A$$

$$I_{c1} = \alpha_1(66^\circ) I_{C\max} = 0.419 \times 0.6 = 0.2514A$$

为了不失真地放大信号，输出回路应采用谐振回路，谐振回路的谐振频率为输入信号的频率。

讨论：通过本题的分析，可以更清楚地理解高频功率放大器的基本原理。三极管的损耗越小，功率放大器的转换效率越高，为了提高高频功率放大器的效率，集电极电流的导通角应小于  $90^\circ$ 。但此时的集电极输出电流为小于半个周期的余弦脉冲，所以输出回路必须是谐振回路，谐振频率为输入信号的频率，这样通过谐振回路滤除无用的谐波分量，只有基波分量产生压降，实现无失真的信号功率放大。

**例 3-2** 某高频谐振功率放大器工作于临界状态，输出功率  $P_I = 6W$ ，集电极电源  $E_c$

$= 24V$ ，集电极电流直流分量  $I_{c0} = 300mA$ ，电压利用系数  $\xi = 0.95$ 。试计算：直流电源提供

的功率  $P_0$ ，功放管的集电极损耗功率  $P_c$  及效率  $\eta$ ，临界负载电阻  $R_{Lcr}$ 。

**题意分析：** 本题直接采用功放的电流、电压、能量关系即可。已知电源电压  $U_{CC}$  以及输出电流的直流分量  $I_{c0}$ ，可以求出集电极电源供给的直流功率  $P_0$ ，从而得到集电极损耗功率  $P_c$  及效率  $\eta$ ，通过电压利用系数  $\xi$ ，可以计算出波形系数  $\gamma$ ，进而利用输出电流的直流分量  $I_{c0}$  求出输出电流里的基波分量  $I_{c1}$ ，再利用输出功率  $P_I$  可以得到临界负载阻抗  $R_{Lcr}$ 。

解：

$$P_0 = U_{CC} I_{c0} = 24 \times 0.3 = 7.2W$$
$$P_c = P_0 - P_I = 7.2 - 6 = 1.2W$$
$$\eta = \frac{P_I}{P_0} = \frac{6}{7.2} = 83.3\%$$
$$\gamma = \frac{2\eta}{\xi} = \frac{2 \times 0.833}{0.95} = 1.75$$
$$I_{c1} = I_{c0} \gamma = 300 \times 1.75 = 525mA$$
$$R_{Lcr} = \frac{2P_I}{I_{c1}^2} = \frac{2 \times 6}{0.525^2} = 43.5\Omega$$

**讨论：** 本题考察的是如何灵活应用功放的电流、电压、能量关系。本题的解题方法还有多种，如由电源电压  $U_{CC}$  以及电压利用系数  $\xi$ ，可以得到输出电压  $U_c$ ，再由输出功率  $P_I$  可以得到临界负载阻抗  $R_{Lcr}$  以及输出电流中的基波分量  $I_{c1}$ 。通过输出电流的直流分量  $I_{c0}$ ，可以计算出波形系数  $\gamma$ ，利用电压利用系数  $\xi$  计算出效率  $\eta$ ，从而得到集电极电源供给的直流功率  $P_0$  以及集电极损耗功率  $P_c$ 。我们在做一道题时，不能局限于我们做出来了，应该能举一反三，从而达到掌握的目的。

**例 3-3** 某高频谐振功率放大器工作于临界状态，输出功率为  $15W$ ，且  $U_{CC}=24V$ ，导通角  $\theta = 70^\circ$ 。功放管参数为： $S_c = 1.5A/V$ ， $I_{CM} = 5A$ 。试问：

- (1) 直流电源提供的功率  $P_0$ ，功放管的集电极损耗功率  $P_c$  及效率  $\eta$ ，临界负载电阻  $R_{Lcr}$  为多少？（注： $\alpha_0(70^\circ) = 0.253$ ， $\alpha_1(70^\circ) = 0.436$ ）。
- (2) 若输入信号振幅增加一倍，功放的工作状态如何改变？此时的输出功率大约为多少？
- (3) 若负载电阻增加一倍，功放的工作状态如何改变？
- (4) 若回路失谐，会有何危险？如何指示调谐？

**题意分析：** 在已知输出功率  $P_I$ 、电源电压  $U_{CC}$ 、临界饱和线斜率  $S_c$  及集电极电流导通角

$\theta$  的情况下, 只要计算出电压利用系数  $\xi_{cr}$ , 其它参数就很容易求出; 输入信号振幅变化、负载电阻变化, 将影响功放的工作状态, 利用功放的振幅特性及负载特性判断即可; 由于谐振时功放工作在临界状态, 此时利用输出电压指示调谐最合适。

**解:** (1) 根据临界状态电压利用系数计算公式有

$$\xi_{cr} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2P_1}{S_c U_{CC}^2 \alpha_1(\theta)}} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2 \times 15}{1.5 \times 24^2 \times 0.436}} \approx 0.91$$

所以  $U_c = U_{CC} \xi_{cr} = 24 \times 0.91 \approx 21.84V$

$$I_{c1} = \frac{2P_1}{U_c} = \frac{2 \times 15}{21.84} \approx 1.37A$$

$$I_{c0} = \frac{I_{c1}}{\alpha_1(\theta)} \alpha_0(\theta) = \frac{1.37}{0.436} \times 0.253 \approx 0.79A$$

$$P_0 = E_c I_{c0} = 24 \times 0.79 = 18.96W$$

$$P_c = P_0 - P_1 = 18.96 - 15 = 3.96W$$

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{15}{18.96} \approx 79\%$$

$$R_{Lcr} = \frac{U_c}{I_{c1}} = \frac{21.84}{1.37} \approx 15.94\Omega$$

(2) 若输入信号振幅增加一倍, 根据功放的振幅特性, 放大器将工作到过压状态, 此时输出功率基本不变。

(3) 若负载电阻增加一倍, 根据功放的负载特性, 放大器将工作到过压状态, 此时输出功率约为原来一半。

(4) 若回路失谐, 功率放大器将工作到欠压状态, 此时集电极损耗将增加, 有可能烧坏晶体三极管。用  $U_c$  指示调谐最明显,  $U_c$  最大即谐振。

**讨论:** 将输出功率的表达式写成与  $i_{cmax}$  及电压利用系数的关系式, 根据在临界状态时动特性曲线的最高点正好在临界饱和线上的特点, 画出临界状态的动特性曲线, 利用曲线写出  $i_{cmax}$  与  $U_{cem}$  之间的关系, 从而得到  $i_{cmax}$  与电压利用系数的关系, 将该关系式代入到功率的表达式中, 可以解出电压利用系数, 由此可以计算出集电极回路其余的参数。输入信号振幅增加, 根据振幅特性功放将工作在过压状态, 此时电压、电流几乎不变, 故输出功率不变; 如果输入信号振幅减小, 电压、电流近似线性减小, 输出功率按平方关系减小。负载电阻增加, 根据负载特性知, 电压几乎不变, 输出功率与负载成反比规律下降; 如果负载电阻减小, 功放工作到欠压状态, 电流几乎不变, 输出功率与负载成反比规律下降。谐振时

功放工作在临界状态，失谐后由于负载阻抗的模值下降，功放工作到欠压状态，在变化的过程中根据负载特性可知电流几乎不变，而电压将减小，故只能用电压指示调谐，输出最大，说明谐振了。

**例 3-4** 一谐振功放，原来工作在临界状态，后来发现该功放的输出功率下降，效率反而提高，但电源电压  $U_{CC}$ 、输出电压振幅  $U_c$  及  $U_{bemax}$  不变，问这是什么原因造成的，此时功放工作在什么状态？

**题意分析：**本题是考察灵活运用功放的外部特性的能力。由电源电压  $U_{CC}$ 、输出电压振幅  $U_c$  及  $U_{bemax}$  不变，可知  $i_{cmax}$  还是在临界饱和线上，工作状态不变。又由于电源电压  $U_{CC}$ 、输出电压振幅  $U_c$  不变，即电压利用系数  $\xi$  不变，根据影响效率  $\eta$  的因素，可知是波形系数  $\gamma$  提高了，即是  $\theta$  减小，本题就归结为影响  $\theta$  的因素了。

**解：**由于  $U_{CC}$ 、 $U_c$  及  $U_{bemax}$  不变，即  $U_{CEmin}$ 、 $U_{BEmin}$  不变，因此功放的工作状态不变。

由于  $\xi = \frac{U_c}{U_{CC}}$ ，所以  $\xi$  不变，而  $\eta = \frac{1}{2} \xi \gamma$ ，故效率的提高是由于  $\gamma$  的增加，这是通过  $\theta$  减小实现的。要减小  $\theta$ ，有两个途径，一是减小输入信号振幅  $U_b$ ，另一是减小  $U_{BB}$ ，但要求  $U_{BEmin}$  不变，故只能减小  $U_{BB}$ ，同时增大输入信号振幅  $U_b$ 。输出功率下降，但  $U_c$  不变，只能是增加负载阻抗。

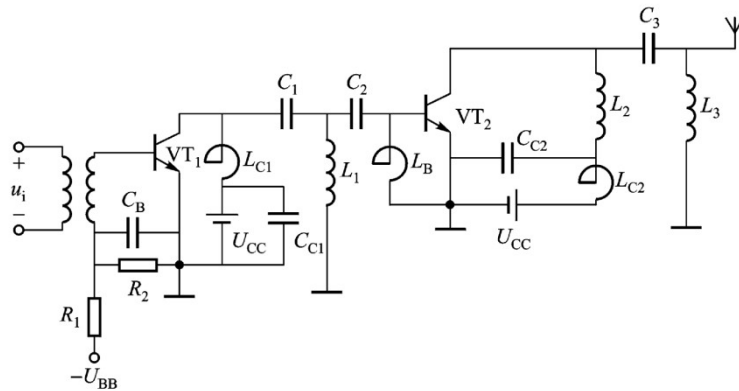
**讨论：**如何应用功放的外部特性来调整功放的工作状态，这是一个难点，需要考虑到每一个外部因素影响。

**例 3-5** 试画出一两级谐振功放的实际线路，要求：

- (1) 两级均采用 NPN 型晶体管，发射极直接接地；
- (2) 第一级基极采用组合式偏置电路，与前级互感耦合；第二级基极采用零偏电路；
- (3) 第一级集电极馈电线路采用并联形式，第二级集电极馈电线路采用串联形式；
- (4) 两级间回路为 T 型网络，输出回路采用  $\pi$  型匹配网络，负载为天线。

**题意分析：**基极馈电和集电极馈电均有串联馈电和并联馈电两种形式，串联馈电是指输入回路或输出回路、三极管、电源三者之间是串联关系，并联馈电是指输入回路或输出回路、三极管、电源三者之间是并联关系。基极馈电还有自偏压、组合偏压等其它形式，零偏压方式是自偏压的一种特殊形式。

**解：**满足上述各项要求的电路图如下图所示。



**讨论：**构成一个实际电路时应满足：交流要有交流通路，直流要有直流通路，而且交流不能流过直流电源，否则电路将不能正常工作，因此设计时需要正确使用阻隔元件：扼流圈  $L_B$ 、旁路或耦合电容  $C_B$ 。画出一个电路后应根据上述的原则进行检查。

**例 3-6** 改正图 P3-2(a)线路中的错误，不得改变馈电形式，重新画出正确的线路。

**题意分析：**这是一个两级功放，分析时可以一级一级的考虑，且要分别考虑输入回路、输出回路是否满足交流要有交流通路，直流要有直流通路，而且交流不能流过直流电源的原则。

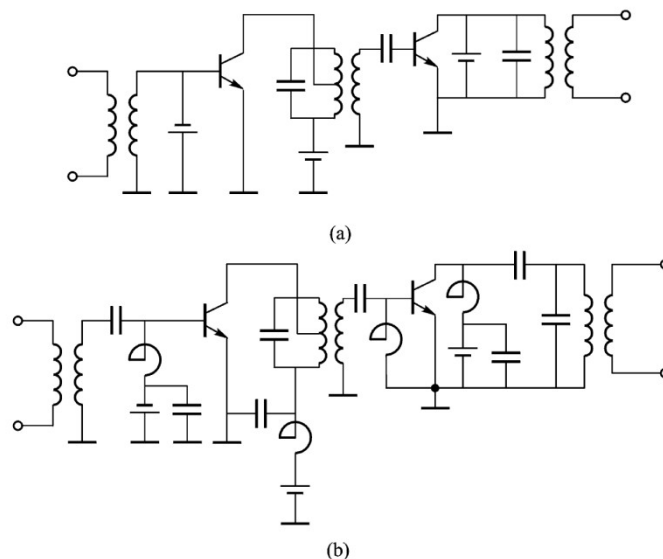


图 p3-2

**解：**第一级放大器的基极回路：输入的交流信号将流过直流电源，应加扼流圈和滤波电容；直流电源被输入互感耦合回路的电感短路，应加隔直电容。

第一级放大器的集电极回路：输出的交流将流过直流电源，应加扼流圈；加上扼流圈后，交流没有通路，故还应加一旁路电容。

第二级放大器的基极回路：没有直流通路，加一扼流圈。

第二级放大器的集电极回路：输出的交流将流过直流电源，应加扼流圈及滤波电容；直流电源将被输出回路的电感短路，加隔直电容。

正确线路如图 P3-2 (b) 所示。

**讨论：** 题目要求不得改变馈电形式，在分析时应搞清输入回路、输出回路的交、直流通路错在哪里，然后才能正确改错。

**例 3-7** 试设计一 L 型匹配网络作为功放的输出电路。已知工作频率  $f = 5\text{MHz}$ ，功放临界电阻  $R_{Lcr} = 100\Omega$ ，天线端电阻  $R = 10\Omega$ 。

**分析：** 根据匹配网络的性质，本题只能选用 L-II 型网络，网络中的参数应如何选择呢？这是本题的主要目的。利用阻抗变换关系可以计算出匹配网络的 Q 值，从而利用第二章谐振回路的特性即可以设计出我们需要的网络。

**解：** 根据匹配网络的性质，采用图 3-28 所示的电路，串联支路用电感，并联支路用电容，这对滤除高频有利（属于低通型）。

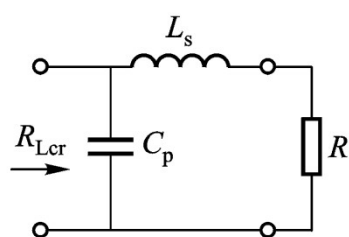


图 P3-3

回路的品质因数

$$Q = \sqrt{\frac{R_{Lcr}}{R} - 1} = 3$$

串联电抗

$$X_s = QR = 30\Omega$$

串联电感

$$L_s = \frac{X_s}{\omega} = 0.95\mu\text{H}$$

并联电容

$$C_p = \frac{1}{\omega X_p} = \frac{1}{\omega \frac{R^2 + X_s^2}{X_s}} = 995\text{pF}$$

**讨论：** 本例只有清楚 L 型网络的阻抗变换，并对谐振回路充分了解的情况下才能正确

分析。一些同学拿到本题后不知如何着手，其实冷静分析一下还是能正确求解的：由阻抗变换的要求，可以利用阻抗变换公式计算出网络所需的  $Q$  值，利用回路的  $Q$  值计算公式  $Q = \omega_0 L / r$  可以得到所需的电感值，由回路谐振频率的计算公式就可以求出  $C$  的解了。