



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

非线性电子线路 第二次习题课 11.24

Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.1 如图 E3.1 所示的甲类功率放大器电路中,若不计变压器损耗,且晶体管的 $U_{CES}=0$, $I_{CEO}=0$,发射极电阻 R_E 上直流压降可忽略不计,放大器输入信号充分激励。

(1) 若输出变压器 Tr_2 的匝数比 $n=4$,放大器实现最佳匹配。求 R_L 所获不失真最大输出功率 P_o 及相应的放大器效率 η_c ;

【Ans. : $P_o=500\text{mW}$, $\eta_c=50\%$ 】

(2) 在维持 I_{CQ} 不变的条件下,不用变压器,直接将扬声器接到集电极,再求不失真最大输出功率 P_o 和 η_c ;

【Ans. : $P_o=83.3\text{mW}$, $\eta_c=8.3\%$ 】

(3) 在维持 I_{CQ} 不变的条件下,将变压器外接负载增大到 16Ω ,求此时的不失真最大输出功率 P_o 和 η_c 。

【Ans. : $P_o=166.7\text{mW}$, $\eta_c=16.7\%$ 】

$$\begin{aligned}
 3.1(1) \quad R_L' &= N^2 R_L = 16 \times 8 = 128 \Omega \\
 V_{CC} + I_{CQ} R_L' &= 2V_{CC} \\
 I_{CQ} &= \frac{V_{CC}}{R_L'} = -93.75 \text{ mA} \\
 P_o &= \frac{1}{2} I_{CQ} V_{CC} = 562.5 \text{ mW}, P_{DC} = I_{CQ} V_{CC} \\
 \eta_c &= \frac{P_o}{P_{DC}} = 50\% \\
 (2) \quad P_o &= \frac{1}{2} I_{CQ}^2 R_L = 35.16 \text{ mW} \\
 \eta_c &= \frac{P_o}{P_{DC}} = 3.13\% \\
 (3) \quad R_L' &= N^2 R_L = 256 \Omega \\
 U_{CE} &= I_{CQ} R_L' = -24 \text{ V}, |U_{CE}| > |V_{CC}|, |V_{omax}| = 12 \text{ V} \\
 P_o &= \frac{V_{omax}^2}{2 R_L'} = 281.25 \text{ mW} \\
 \eta_c &= \frac{P_o}{P_{DC}} = 25\%
 \end{aligned}$$

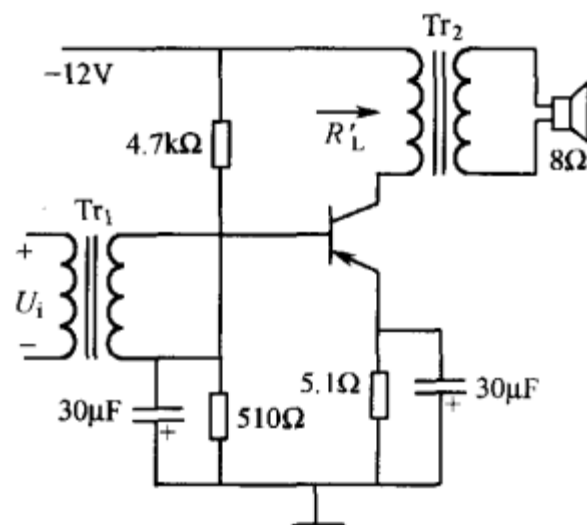


图 E3.1

Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.3 如图 E3.3 所示为互补对称功放电路,设在正弦激励的情况下,负载电流的幅度为 $I_L = 0.45\text{A}$,求:

(1) 负载获得的功率 P_L ;

【Ans.: $P_L = 3.54\text{W}$ 】

(2) 电源提供的功率 P_{DC} 和放大器的效率 η_C 。

【Ans.: $P_{DC} = 5.01\text{W}$, $\eta_C = 70.7\%$ 】

$$\begin{aligned} 3.3 \quad (1) \quad P_L &= \frac{1}{2} I_L^2 R_L = 3.54\text{W} \\ (2) \quad P_{DC} &= \frac{2I_L}{2} \frac{V_{CC}}{2} = 5.01\text{W} \\ \eta &= \frac{P_L}{P_{DC}} = 70.7\% \end{aligned}$$

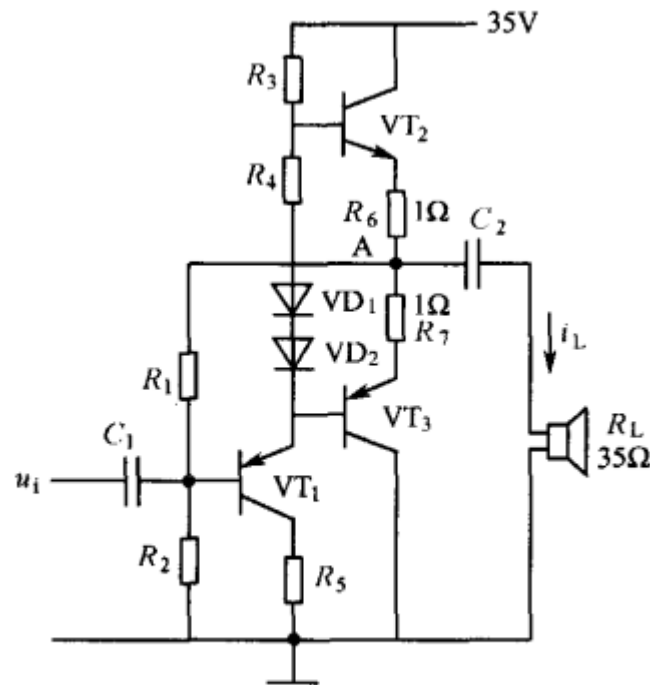


图 E3.3

Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.5 如图 E3.5 所示的有输入缓冲级的互补对称乙类放大器, 设 $R_1 = R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_L = 100\Omega$, 所有晶体管 $\beta = 60$, $U_{BE}(\text{nnp}) = U_{EB}(\text{pnp}) = 0.6\text{V}$, 计算电流增益, 即输出到负载电流 i_o 与缓冲级输入电流 i_i 之比。(提示: VT_1 、 VT_3 、 VT_2 、 VT_4 分别组成射极跟随器, 因此有 $u_o \approx u_i$)

【Ans. : $A_1 = 459$ 】

3.5 VT_1 、 VT_3 一直导通 (交流小信号分析, 不用考虑直流压降)
 $u_i > 0$ 时 VT_3 导通, VT_2 截止, VT_1 、 VT_4 均看作射极跟随器
 对上半部分:

$$(\beta+1)i_{B1} + i_{B3} + \frac{u_i}{R_1} = 0$$

$$(\beta+1)i_{B3} = \frac{u_o}{R_L} = \frac{u_i}{R_L}$$

$$i_o = (\beta+1)i_{B3}$$

$$i_i = -2i_{B1} \quad (\text{近似处理})$$

$$\Rightarrow A = \frac{i_o}{i_i} = 459.33$$

 另: $i_i = -i_{B1} + i_{B2}$

$$i_{B2} = \frac{u_i}{(1+\beta)R_2}$$

$$\Rightarrow A = \frac{i_o}{i_i} = 524.08$$

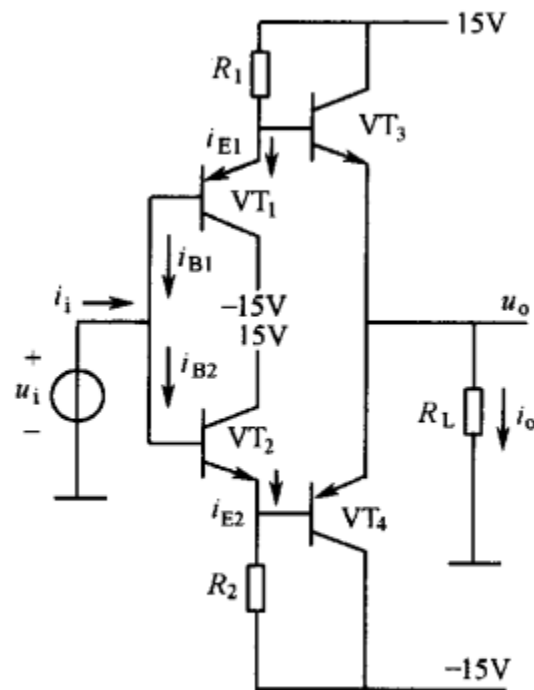


图 E3.5

Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.9 谐振功率放大器工作在临界状态, 已知 $V_{CC}=30V$, $-E_B=U_T=0.6V$, $\xi=0.96$, 临界动态线斜率 $G_{cr}=0.4S$ 。求 η_c , P_o , R_T , P_c 值。

【Ans.: $\eta_c = 75.4\%$, $P_o = 3.456W$, $R_T = 120\Omega$, $P_c = 1.128W$ 】

$$3.9 \quad \varphi = \cos^{-1} \frac{U_T + E_B}{U_b} = 90^\circ \quad \alpha_0(\varphi) = 0.3183, \alpha_1(\varphi) = 0.5$$

$$\eta_c = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1(\varphi)}{\alpha_0(\varphi)} \xi = 75.4\% \quad \xi = \frac{U_c}{V_{CC}} \Rightarrow U_c = 28.8V$$

$$\text{临界: } V_{CC} - \frac{V_{CC} - U_c \cos \varphi}{1 + \frac{G_{cr} U_c}{g_m U_b}} = U_c$$

$$\Rightarrow g_m U_b = 0.48A$$

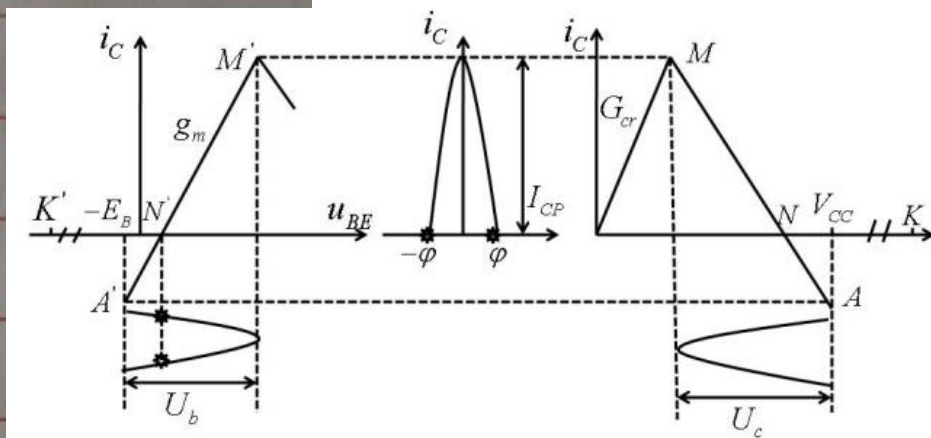
$$I_{cp} = g_m U_b (1 - \cos \varphi) = 0.48A$$

$$I_{c1} = I_{cp} \alpha_1(\varphi) = 0.24A$$

$$P_o = \frac{1}{2} I_{c1} U_c = 3.456W$$

$$R_T = \frac{U_c}{I_{c1}} = 120\Omega$$

$$P_c = P_{DC} - P_o = \frac{P_o}{\eta_c} - P_o = 1.128W$$



Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.11 谐振功率放大器原来工作在临界状态,且 $\varphi = 70^\circ$, $P_o = 3\text{W}$, $\eta_c = 60\%$ 。后来发现其性能发生变化,发现 P_o 减小,而 η_c 却增加到 68% ,但 V_{CC} 、 U_c 、 $u_{BE\max}$ 却保持不变。试问此时放大器工作在什么状态? P_o 和 φ 值各为多大? 并分析性能变化的原因。

【Ans.: $\varphi = 26.9^\circ$, $P_o = 1.3375\text{W}$ 】

3.11 临界状态 $\eta_c = \frac{\alpha_1(\varphi)}{2\alpha_0(\varphi)} \xi = 60\% \Rightarrow \xi = 0.695$

$\therefore V_{CC}, U_c$ 保持不变 $\therefore \xi$ 不变

改变后 $\eta'_c = \frac{\alpha_1(\varphi')}{2\alpha_0(\varphi')} \xi = 68\%$

$\Rightarrow \varphi' = 26.73^\circ$

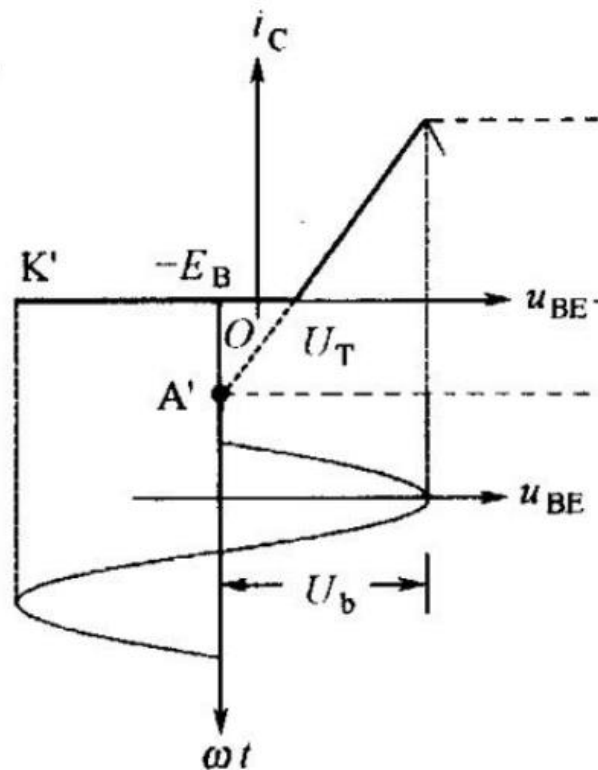
$\therefore u_{BE\max}$ 不变 故仍工作于临界状态

$P_o = \frac{1}{2} I_{c1} U_c = \frac{1}{2} I_{cp} \alpha_1(\varphi) U_c$

$\Rightarrow P_o' = \frac{\alpha_1(\varphi')}{\alpha_1(\varphi)} P_o = 1.329$

φ 变小, $I_{c1} = I_{cp} \alpha_1(\varphi)$ 变小,

$R_T = \frac{U_c}{I_{c1}}$ 变大



Chapter 3



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

3.12 已知谐振功率放大器的输出动态特性曲线如图 E3.9 中折线 MNK 所示,求:

(1) 该放大器工作在什么状态?

【Ans.: 欠压状态】

(2) 求 V_{CC} 、 U_c 、 φ 值;

【Ans.: $V_{CC} = 24V$, $U_c = 10V$, $\varphi = 32.86^\circ$ 】

(3) 若保持 V_{CC} 、 U_b 、 $-E_B$ 不变,要增大输出功率,提高转换效率,应如何变化谐振功放负载 R_T ? 所能达到的最大转换效率 η_c 为何值?

【Ans.: $\eta_c = 76.6\%$ 】

3.12 (1) 欠压状态

(2) M点横坐标: $V_{CC} - U_c = 14$

N点横坐标: $V_{CC} - U_c \cos \varphi = 22$

K点横坐标: $V_{CC} + U_c = 34$

$$\Rightarrow V_{CC} = \frac{14 + 34}{2} = 24V, U_c = 10V$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{V_{CC} - 22}{U_c} = 78.46^\circ$$

(3) R_T 变大, 当工作于临界状态时求最大 η'_c

$$U'_c = 24 - 5 = 19V, \varphi \text{ 不变}$$

$$\alpha_1(\varphi) = 0.472 - \frac{0.472 - 0.4549}{80 - 75} (80 - 78.46) = 0.4667$$

$$\alpha_0(\varphi) = 0.286 - \frac{0.286 - 0.2693}{80 - 75} (80 - 78.46) = 0.2809$$

$$\eta'_c = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1(\varphi) U'_c}{\alpha_0(\varphi) V_{CC}} = 65.8\%$$

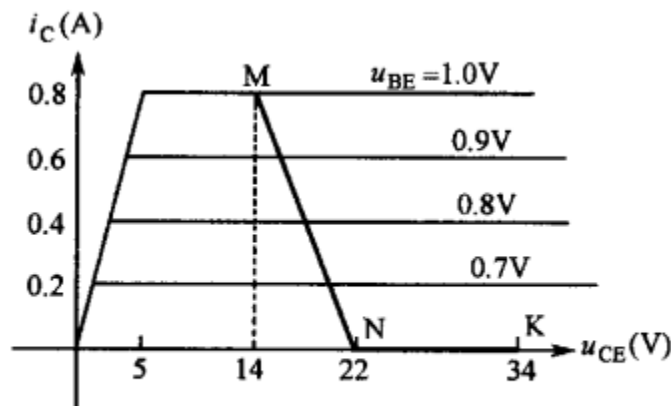


图 E3.9

Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.13 假设谐振功放的输出动态特性如图 E3.10 中的折线 MNK 所示, 试根据此动态特性计算功放的输出功率 P_o 和转换效率 η_c 。

【Ans. : $P_o = 875.84\text{mW}$, $\eta_c = 83.7\%$ 】

3.13 由图 $V_{CC} = 12\text{V}$, $U_c = V_{CC} - 0.8 = 11.2\text{V}$

$N(0.8, 400)$, $A(12, 400)$ 故 N 为 AM 中点

$\therefore N(6.4, 0)$ $V_{CC} - U_c \cos\varphi = 6.4$

$\Rightarrow \varphi = 60^\circ$ $\eta_c = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1(\varphi)}{\alpha_0(\varphi)} \frac{U_c}{V_{CC}} = 83.7\%$

$I_{c1} = I_{cp} \alpha_1(\varphi) = 0.1564\text{A}$

$P_o = \frac{1}{2} I_{c1} U_c = 875.84\text{mW}$

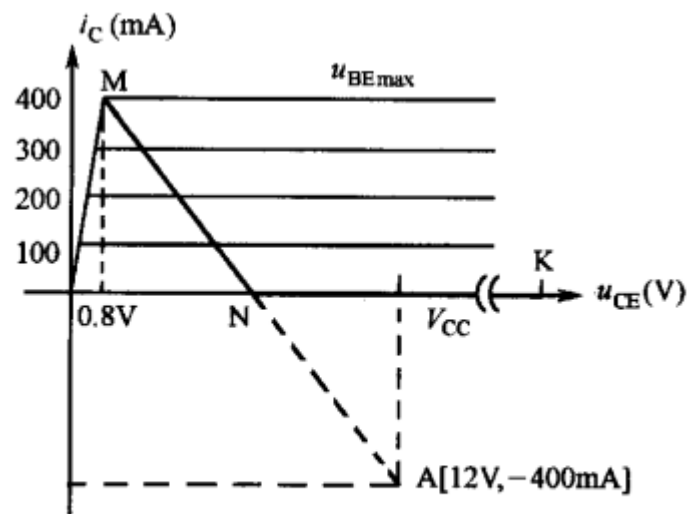


图 E3.10

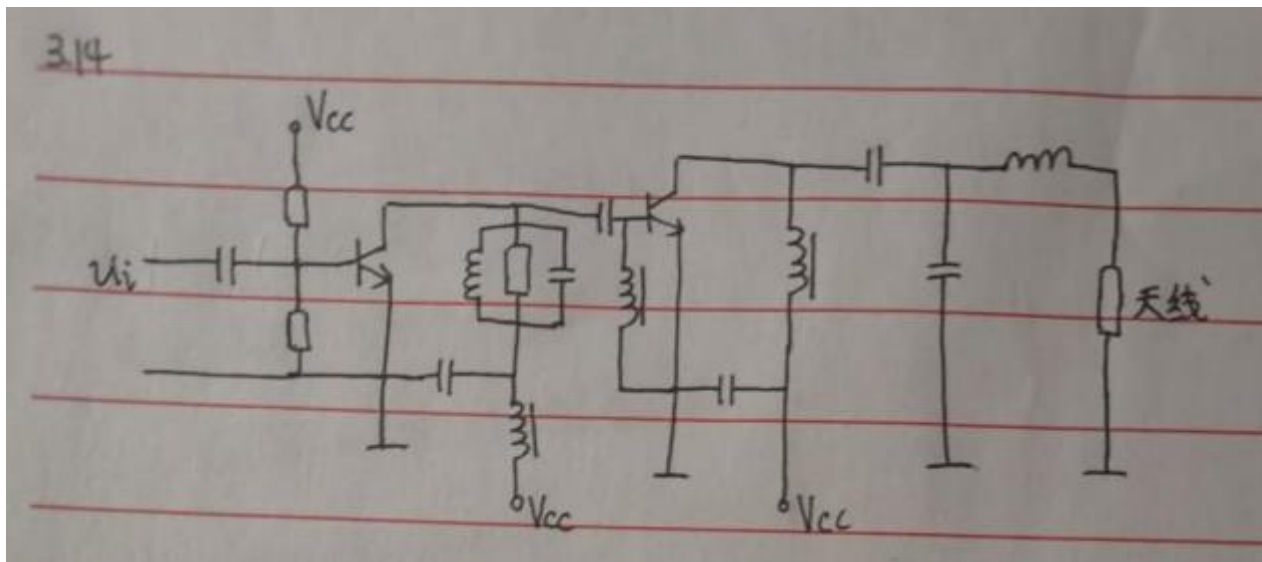
Chapter 3



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.14 按下列要求画出一个谐振功率放大器原理电路。

- (1) 采用 NPN 功率管；
- (2) 两级皆为共射放大器，且共用一个正电源；
- (3) VT_1 管集电极用并联谐振回路，串联馈电，基极用分压式偏置；
- (4) VT_2 管集电极为并联馈电，采用 L 型匹配网络与天线匹配，基极用自生负偏压电路。



Chapter 3



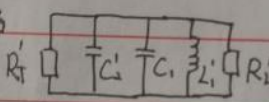
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3.16 已知如图 E3.12 所示的 T 型匹配网络中,负载电阻为 R_L ,放大器要求的阻抗为 R_T 。

(1) 设 $Q_{e1} = X_{L1}/R_L$, 且满足 $Q_{e1}^2 > R_T/R_L - 1$, 试推导阻抗变换公式;

(2) 若给定 $R_L = 100\Omega$, $Q_{e1} = 4$, $f = 50\text{MHz}$, $R_T = 250\Omega$, 确定 C_1 、 C_2 、 L_1 的值。

3.16 等效电路



(1)
$$\begin{cases} R_T' = R_T(1 + Q_{e2}^2) \\ X_{C1}' = X_{C1}(1 + \frac{1}{Q_{e1}^2}) \\ R_L' = R_L(1 + Q_{e1}^2) \\ X_{L1}' = X_{L1}(1 + \frac{1}{Q_{e1}^2}) \end{cases}$$
 其中 $Q_{e1} = \frac{|X_{L1}|}{R_L}$, $Q_{e2} = \frac{|X_{C2}|}{R_T}$

(2) $f = 50\text{MHz}$, $\omega = 2\pi f = 10^8\text{ rad/s}$

匹配条件 $R_L' = R_T$

$$\Rightarrow Q_{e2} = \sqrt{\frac{R_L}{R_T}(1 + Q_{e1}^2) - 1} = 2.408$$

$$|X_{C2}| = Q_{e2}R_T = 602 = \frac{1}{\omega C_2} \Rightarrow C_2 = 5.288\text{ pF}$$

$$|X_{L1}| = Q_{e1}R_L = 400 = \omega L_1 \Rightarrow L_1 = 1.273\text{ }\mu\text{H}$$

谐振 $\frac{1}{X_{L1}'} + \frac{1}{X_{C1}'} + \frac{1}{X_{C2}'} = 0$

$$\frac{1}{\omega L_1'} - \omega C_1 - \omega C_2' = 0 \Rightarrow \omega^2 L_1'(C_1 + C_2') = 1$$

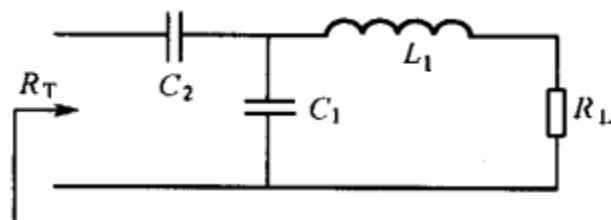
$$\Rightarrow C_1 = 2.98\text{ pF}$$


图 E3.12

Chapter 5



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

5.1 对图 E5.1 所示的电路,假定所有晶体管的 β 值足够高,恒流源晶体管的 U_{BE} 取为 $0.7V$ 。其他参数如下: $V_{CC1}=5V, V_{CC2}=12V, -V_{EE}=-12V; R_C=910\Omega, R_B=4k\Omega, R_E=1k\Omega$ 。

(1) 推导输出电压 $u_o(t)$ 的表达式。

【Ans: $u_o = 1.82(1 + 0.09\cos 10^3 t)\cos 10^7 t(V)$ 】

(2) 若 $u_1(t) = 1\cos 10^3 t(V), u_2(t) = 2\cos 10^7 t(V)$, 试画出 $u_o(t)$ 的波形示意图和频谱图。

5-1(1) 偏置电路: β 值足够高, 忽略 I_3

$$0 - R_B I_X - U_{BE} = -V_{EE} \Rightarrow I_X = 2.825mA$$

$$u_1 - I_Y R_B - U_{BE} = -V_{EE} \Rightarrow I_Y = \frac{11.3 + u_1}{R_B}$$

$u \rightarrow i$ 线性变换电路: $R_E I_X = 2.835 > 50U_T = 1.3$

$$\begin{cases} i_1 = \alpha(I_X + \frac{u_1}{R_E}) \\ i_2 = \alpha(I_X - \frac{u_2}{R_E}) \end{cases} \quad \alpha = 1$$

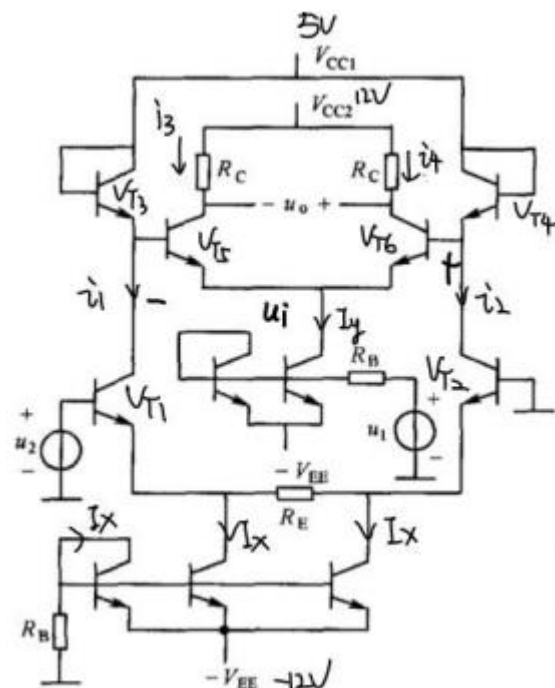
$$\text{对 } V_{T5}, V_{T6} \quad u_o = (V_{C2} - i_4 R_C) - (V_{C2} - i_3 R_C) = (i_3 - i_4) R_C$$

$$\text{差分电路: } i_3 - i_4 = -\alpha I_Y \tanh(\frac{u_i}{2U_T})$$

$$\text{对 } V_{T3}, V_{T4} \quad u_i = U_{BE3} - U_{BE4} = U_T \ln(\frac{i_3}{i_4})$$

$$\therefore u_o = -I_Y R_C \tanh(\frac{u_i}{2U_T}) = -I_Y R_C \frac{\exp(\frac{u_i}{U_T}) - 1}{\exp(\frac{u_i}{U_T}) + 1} = -I_Y R_C \frac{i_3/i_4 - 1}{i_3/i_4 + 1} = -I_Y R_C \frac{i_3 - i_4}{i_3 + i_4}$$

$$\Rightarrow u_o = -I_Y R_C \frac{u_2}{I_X R_E} = -1(1 + \frac{u_1}{11.3}) \times 0.91 u_2$$



Chapter 5



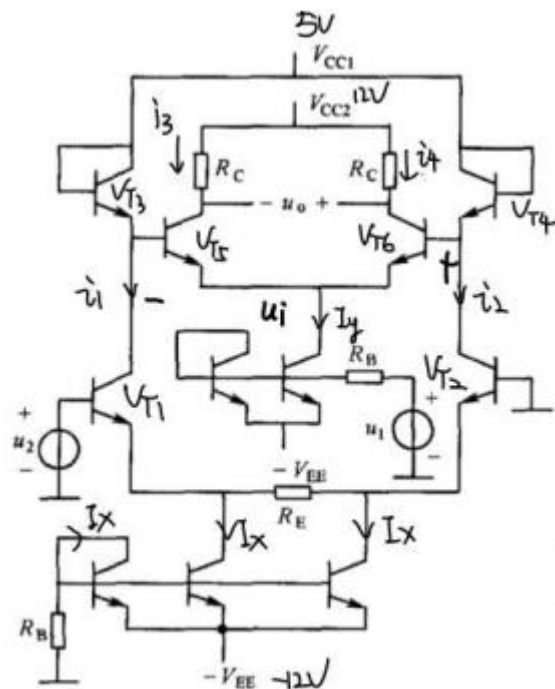
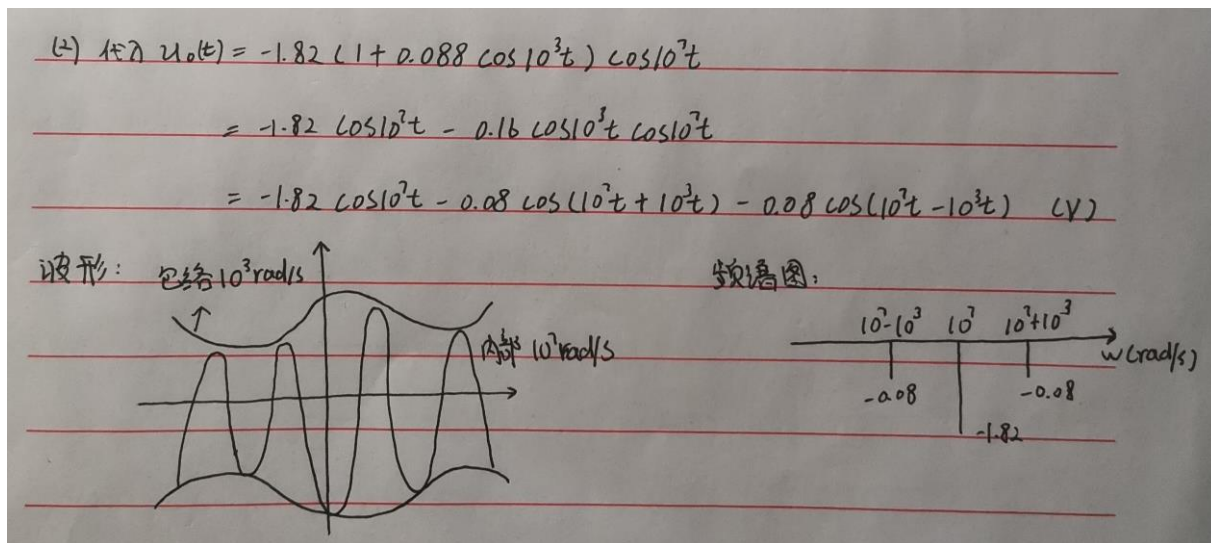
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

5.1 对图 E5.1 所示的电路,假定所有晶体管的 β 值足够高,恒流源晶体管的 U_{BE} 取为 $0.7V$ 。其他参数如下: $V_{CC1}=5V, V_{CC2}=12V, -V_{EE}=-12V; R_C=910\Omega, R_B=4k\Omega, R_E=1k\Omega$ 。

(1) 推导输出电压 $u_o(t)$ 的表达式。

【Ans: $u_o = 1.82(1 + 0.09\cos 10^3 t)\cos 10^7 t (V)$ 】

(2) 若 $u_1(t) = 1\cos 10^3 t (V), u_2(t) = 2\cos 10^7 t (V)$, 试画出 $u_o(t)$ 的波形示意图和频谱图。



Chapter 5



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

5.5 试分别求出如图 E5.5(a), (b), (c) 所示 3 电路输出电压的表达式。设所有二极管的特性均为从原点出发、斜率为 g_D 的直线。且 $U_L \gg U_S, R_L \gg 1/g_D$ 。

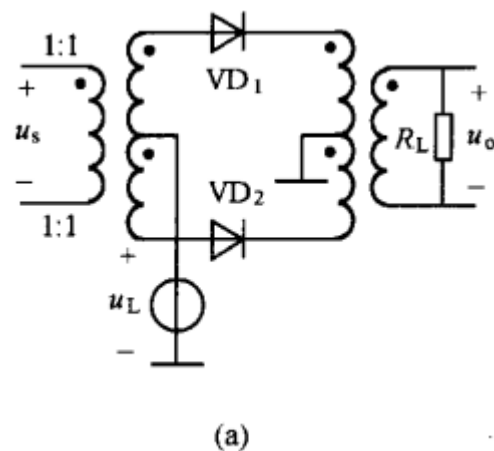
5.5(a) $U_L \gg U_S$ 二极管关断完全受控于 U_L

$U_L > 0$ 时, VD_1, VD_2 导通, $U_L < 0$ 时, VD_1, VD_2 截止, $U_o = 0$

$$U_L > 0: \begin{cases} U_L + U_S - U_{D1} - U_o^+ = 0 \\ U_L - U_S - U_{D2} + U_o^+ = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{D1} = U_S + U_L - U_o^+ \\ U_{D2} = U_L - U_S + U_o^+ \end{cases}$$

$$U_o^+ = (i_{D1} - i_{D2}) R_L = (g_D U_{D1} - g_D U_{D2}) R_L = 2g_D (U_S - U_o^+) R_L$$

$$\Rightarrow U_o^+ = \frac{2g_D U_S R_L}{2g_D R_L + 1}, \quad U_o = U_o^+ K^+(u_{st}) = \frac{2g_D U_S R_L}{2g_D R_L + 1} K^+(u_{st})$$



Chapter 5



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

5.6 设图 E5.6 所示电路中,场效应管的 $I_{DSS} = 10\text{mA}$, $U_P = -2\text{V}$; $R_1 = R_E = 5\text{k}\Omega$, $R_L = 4\text{k}\Omega$, $C = 0.25\mu\text{F}$, $V_{CC} = V_{EE} = 5\text{V}$; $u_1(t) = 1.2\cos 10^3 t \cos 10^7 t$, $u_2(t)$ 为图 E5.6(b) 所示方波。设晶体管 β 足够大,试求输出电压的表达式及纹波大小(纹波可近似定义为一次高频电压幅度与低频电压幅度之比)。

5-6 u_1 为高电平(0V)时,场效应管充分导通, $u_{ab} = 0$

u_2 为低电平($-3\text{V} < U_P$)时, ... 截止, $u_{ab} = u_2$

$$u_i = u_1(t) K(\omega_c t) = 1.2 \cos 10^3 t \cos 10^7 t \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos 10^7 t + \dots \right)$$

$$\beta \text{ 足够大, } i_E = i_C = \frac{u_i - U_{BE} + V_{EE}}{R_E}, \quad \omega_c = \frac{1}{RC} = \frac{1}{4 \times 10^3 \times 0.25 \times 10^{-6}} = 10^3 \text{ rad/s}$$

$$RC \text{ 并联网络传输函数 } H(j\omega) = R_L \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R_L}{1 + j\omega RC}$$

$$H(j10^3) = \frac{R}{1+j}, \quad 10^3 \text{ rad/s 的频率分量通过此网络会有 } \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ 幅值衰减及 } -45^\circ \text{ 相移}$$

$$i_C = \frac{u_i + 4.3}{5} \text{ mA}, \quad 10^3 \text{ rad/s 电流幅值 } I_{C1} = 1.2 \times \left(-\frac{2}{\pi}\right) \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = -0.076 \text{ mA}$$

$$u_o = -I_{C1} |Z| \cos(10^3 t - \frac{\pi}{4}) = 0.215 \cos(10^3 t - \frac{\pi}{4}) \text{ V}$$

$$\gamma = \frac{U_{ohigh}}{U_{olow}} = \frac{I_{C2} |Z|}{I_{C1} |Z|}, \quad U_{ohigh} \text{ 为高频 } (10^7 + 10^3 \text{ rad/s}) \text{ 电压幅值}, \quad \omega_c \approx 10^7 \text{ rad/s}$$

$$I_{C2} = 1.2 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{0.06}{\sqrt{2}} \text{ mA}, \quad |Z| = \frac{R_L}{\sqrt{1 + \omega_c^2 R_L^2 C^2}} = \frac{R_L}{\sqrt{1 + 10^8}}$$

$$\therefore \gamma = \frac{0.024 R_L / 10^4}{0.076 R_L / \sqrt{2}} \times 100\% = \frac{0.024}{0.076 \sqrt{2}} \times 100\% = 0.011\%$$

