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

非线性电子线路
第一次习题课
9.26

1.2 设非线性电导的特性为 $i=5u+u^2-0.5u^3$(mA)。试求下列两种情况下，非线性器件的静态电导 G、小信号电导 g 和等效基波电导 G_{m1}。

(1) $U_Q=1$ V, $u=U_Q+0.5\cos\omega t$ (V)

注：1.U_{BE}、U_{be}、u_{BE}、u_{be}的区别： $u_{BE}=U_{BE}+u_{be}=U_{BE}+U_{be}\cos(wt)$

①U_{BE}：直流电压值 ②U_{be}：交流电压幅值

③u_{BE}：直流信号和交流信号叠加后的信号 ④u_{be}：纯交流信号

2.几个电导的区别与计算：

①静态电导G：取决于直流工作点电流和电压，$G=\frac{I_Q}{U_Q}$

②动态电导（小信号电导）：$g=\frac{\partial i}{\partial u}|u=U_Q$，其中$u=U_Q+u, i=I_Q+gu$

③谐波等效电导：激励电压为$u=U_Q+U_i cos(\omega t)$，响应电流为$i(t)=I_0+I_1 cos(\omega t)+I_2 cos(2\omega t)+\cdots+I_n cos(n\omega t)+\cdots$，此时基波等效电导为$G_{m,1}=\frac{I_1}{U_i}$，n次谐波等效电导为：$G_{m,n}=\frac{I_n}{U_i}(n=1,2,3\text{等})$

1.2　设非线性电导的特性为 $i=5u+u^2-0.5u^3$ (mA)。试求下列两种情况下，非线性器件的静态电导 G、小信号电导 g 和等效基波电导 G_{m1}。

(1) $U_Q=1$ V，$u=U_Q+0.5\cos\omega t$ (V)

$i=5u+u^2-0.5u^3$

当 $U_Q=1V$ 时　$u=1+0.5\cos\omega t$

$G=\frac{I_Q}{U_Q}=\frac{5+1-0.5\times1}{1}=5.5\,mS$

$g=\frac{\partial i}{\partial u}\Big|_{u=U_Q}=(5+2u-0.5\times3u^2)\Big|_{u=1}=5.5\,mS$

$G_{m1}=\frac{I_1}{U_i}$

$i=5\times(1+0.5\cos\omega t)+(1+0.5\cos\omega t)^2-0.5\times(1+0.5\cos\omega t)^3$

$=5.5+2.75\cos\omega t-0.125\cos^2\omega t-0.0625\cos^3\omega t$

$\therefore I_1=2.75-0.0625\times\frac{3}{4}=2.703125\,mA$

$G_{m1}=\frac{I_1}{U_i}=\frac{2.703125}{0.5}=5.40625\,mS$

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

1.3 对题 1.2 所给的器件特性，试计算下列两种情况下，响应电流的各个频率分量大小，并画出电流的频谱示意图。

(3) $u=\cos 2\pi\times 10^{3}t+\cos 2\pi\times 10^{6}t$ (V)

$$i=5u-2u^{2}$$

1.3(3) $i=5u-2u^2$, $u=\cos 2\pi\times 10^3 t+\cos 2\pi\times 10^6 t$ (V)

设 $u=\cos\omega_1 t+\cos\omega_2 t$

$i=5\times(\cos\omega_1 t+\cos\omega_2 t)-2\times(\cos\omega_1 t+\cos\omega_2 t)^2$

$=5\cos\omega_1 t+5\cos\omega_2 t-2\cos^2\omega_1 t-4\cos\omega_1 t\cos\omega_2 t-2\cos^2\omega_2 t$

$=5\cos\omega_1 t+5\cos\omega_2 t-(1+\cos 2\omega_1 t)-4\times\frac{1}{2}[\cos(\omega_2-\omega_1)t+\cos(\omega_2+\omega_1)t]-(1+\cos 2\omega_2 t)$

$=5\cos\omega_1 t+5\cos\omega_2 t-\cos 2\omega_1 t-\cos 2\omega_2 t-2\cos(\omega_2-\omega_1)t-2\cos(\omega_2+\omega_1)t-2$

0: −2 ω_1: 5 $\omega_2-\omega_1$: −2 $2\omega_1$: −1

ω_2: 5 $\omega_2+\omega_1$: −2 $2\omega_2$: −1

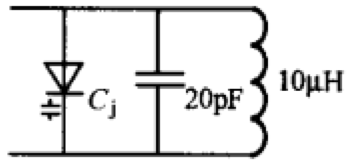
其中 $\omega_1=2\pi\times 10^3$

$\omega_2=2\pi\times 10^6$

1.4 设非线性电容 C_j 特性为

$$C_j = 20(1+0.25u)^{-0.5}\,(\mathrm{pF})$$

若 u 在 1～3V 范围内变化(图中，C_j 的控制电路未画出)，试画出图 E1.4 所示 3 种接法下，回路的谐振频率 f 与 u 的关系。



1.4 (b). $f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$ $C = C_j \parallel C_1 = C_j + C_1 = 20+20\times(1+0.25u)^{-0.5}$ (pF)

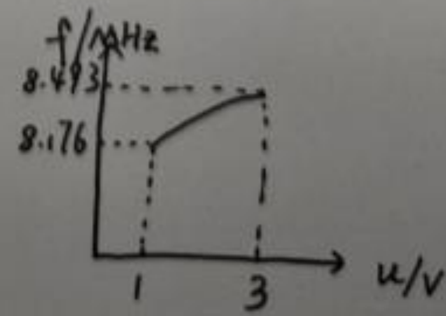
$L = 10\mu H$

$$\therefore f = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-5}\times[20+20\times(1+0.25u)^{-0.5}]\times 10^{-12}}}$$

$$= \frac{10^8}{2\pi}\times\frac{1}{\sqrt{2+2\times(1+0.25u)^{-0.5}}}$$

$u=1$, $f = 8.176\times10^6$ Hz

$u=3$, $f = 8.493\times10^6$ Hz



2.1 已知如图 E2.1 所示电路中，VT_1 为指数律晶体管，$I_{ES}=2\times10^{-13}$ mA。VT_2，VT_3 为折线律晶体管，$U_{BE}=0.7$V，所有晶体管 $\alpha=0.98$。求：

(1) 计算恒流源电流 I_K；

(2) 计算静态时高频旁路电容 C_E 上压降 U_{C_E0}；

(3) 当输入 $u_i=0.52\cos\omega t$ (V)时，C_E 上稳态压降 U_{C_E}。

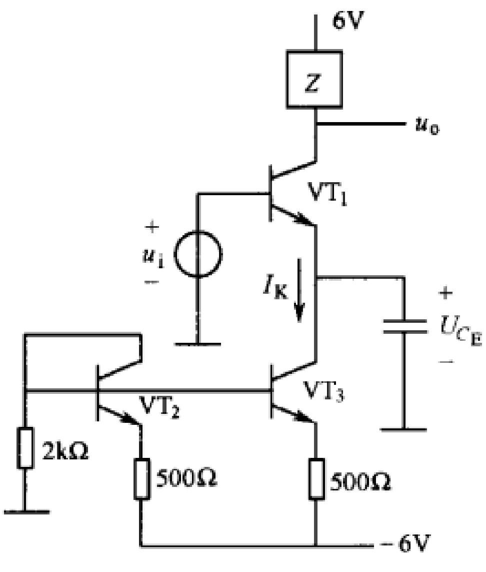
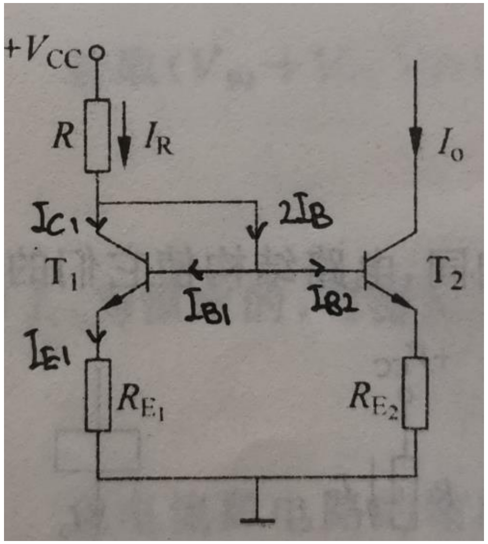


图 E2.1



线电知识电流镜

2.(1)
$$\begin{cases} 0-2\cdot(I_{C2}+2I_B)-U_{BE}-0.5I_{E2}=-6 \\ I_{C2}=\beta I_B,\ \beta=\dfrac{\alpha}{1-\alpha} \\ I_{C2}=\alpha I_{E2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_K=I_{C3}=I_{C2}=2.045\text{mA}$$

2.1 已知如图 E2.1 所示电路中，VT_1 为指数律晶体管，$I_{ES}=2\times10^{-13}$ mA。VT_2，VT_3 为折线律晶体管，$U_{BE}=0.7$V，所有晶体管 $\alpha=0.98$。求：

(1) 计算恒流源电流 I_K；

(2) 计算静态时高频旁路电容 C_E 上压降 $U_{C_{E}0}$；

(3) 当输入 $u_i=0.52\cos\omega t$ (V)时，C_E 上稳态压降 U_{C_E}。

$$I_K = I_{ES} e^{\frac{U_{BE}}{U_r}}$$

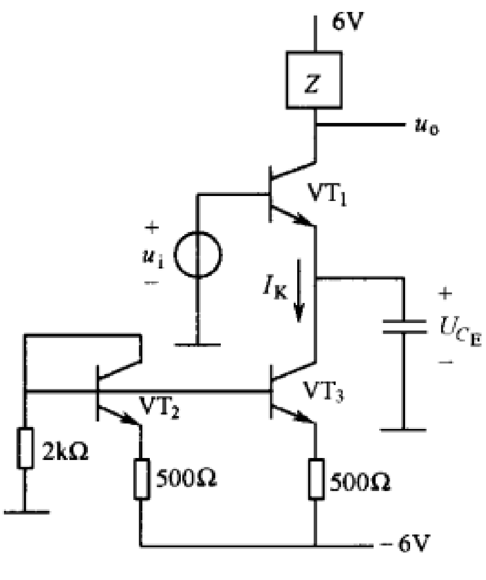


图 E2.1

(2) $U_{CE0} = -U_{BE}$ 静态：$I_K = I_{EQ} = I_{E0} = I_{ES}\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$

$\Rightarrow U_{BE} = U_T \ln\frac{I_{E0}}{I_{ES}} = 26\times\ln\frac{2.045}{2\times10^{-13}} = 778.85\,mV$

$\therefore U_{CE0} = -778.85\,mV$

(3) $x = \frac{U_i}{U_T} = \frac{0.52}{0.026} = 20$ $\qquad I_0(20) = 0.08978\,e^{20}$

$U_{CE} = -U_T\left[\ln\frac{I_K}{I_{ES}} - \ln I_0(x)\right]$

$= -26\left[\ln\frac{2.045}{2\times10^{-13}} - \ln 0.08978e^{20}\right]$

$= -321.49\,mV$

$$I_{E0} = I_{ES} e^{\frac{-U_{CE}}{U_r}} I_0(x) = I_K$$

2.2 如图 E2.2 所示电路中，晶体管 $\alpha\approx1$，$u_i=260\cos10^7t$ (mV)。

(1) 设 $C=2000$pF，$L=5\mu$H，求等效基波跨导 G_{m1}，输出电压 $u_o(t)$ 表达式及其总谐波失真 THD；

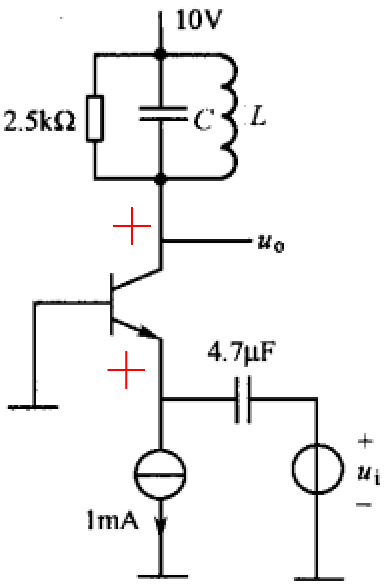


图 E2.2

2.2(1) $\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{5\times10^{-6}\times2000\times10^{-12}}}=10^7$ rad/s 提基波

$I_{E0}=1mA$　　$G_{m1}=\frac{\alpha I_{E0}}{U_T}\frac{2I_1(x)}{xI_0(x)}$

$x=\frac{0.26}{0.026}=10$，　$\frac{2I_1(x)}{xI_0(x)}=0.18972$

$\Rightarrow G_{m1}=\frac{1}{26}\times0.18972=7.297\times10^{-3}$ S

$u_o(t)=10+G_{m1}(x)R_L\cdot u_i$

$=10+7.297\times10^{-3}\times2.5\times10^3\times0.26\cos10^7t$

$=10+4.74\cos10^7t$ (V)

$Q=\omega_0RC=10^7\times2.5\times10^3\times2000\times10^{-12}=50$

$\mathrm{THD}=\frac{1}{Q}D(x)=\frac{1}{50}\times0.6363=1.27\%$

$$G_{m1}(x)=\frac{\alpha I_{E0}}{U_r}\frac{2I_1(x)}{xI_0(x)}$$

求x时Ui指幅值的绝对值（x>0）

注：判断交流极性的方法：

①对于三极管：共基极为“+”，共发射极为“-”，共集电极为“+”

②对于MOS管以及其他的FET：共栅极为“+”，共源极为“-”，共漏极为“+”

2.3 电阻分压偏置晶体管放大器如图 E2.3 所示。C_B,C_C 为耦合电容,C_E 为高频旁路电容,晶体管 $\beta=50$。设 $u_i=390\cos\omega_0 t$ (mV),集电极回路调谐于 ω_0。其他参数如图示。求负载 R_L 得到的平均功率。

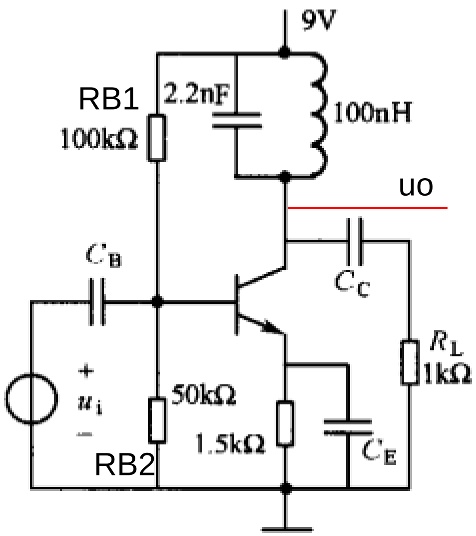
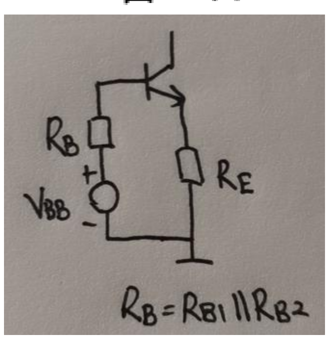


图 E2.3



基极直流回路

$$G_{m1}(x) = g_{mQ}[1+\frac{\ln I_0(x)}{x_\lambda}]\frac{2I_1(x)}{xI_0(x)}$$

2.3 $V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} V_{cc} = \frac{50}{50+100} \times 9 = 3V$

$R_B = R_{B1} \| R_{B2} = \frac{100 \times 50}{100+50} = 33.33\,k\Omega$

$I_{EQ} = \frac{V_{BB}-0.7V}{R_E + \frac{R_B}{1+\beta}} = \frac{3-0.7}{1.5+\frac{33.33}{51}} = 1.068\,mA$

$x_\lambda = \frac{V_{BB}-0.7}{U_T} = \frac{3-0.7}{0.026} = 88.46$

$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} = 0.98$ $\quad g_{mQ} = \frac{\alpha I_{EQ}}{U_T} = \frac{0.98 \times 1.068}{0.026} = 40.255\,ms$

$x = \frac{U_i}{U_T} = \frac{0.39}{0.026} = 15$ $\quad \ln I_0(x) = \ln\frac{I_0(x)}{e^x} + x = \ln 0.1039 + 15 = 12.736$

$\frac{I_0(x)}{e^x} = 0.1039$ $\quad \frac{2I_1(x)}{xI_0(x)} = 0.12881$

$G_{m1}(x) = g_{mQ}[1+\frac{\ln I_0(x)}{x_\lambda}]\frac{2I_1(x)}{xI_0(x)} = 40.255[1+\frac{12.736}{88.46}] \times 0.12881 = 5.932\,ms$

$U_o = G_{m1}(x) U_i \cdot R_L = 5.932 \times 0.39 \times 1 = 2.313\,V$, $u_o(t) = 9 - 2.313\cos\omega_0 t$ (V)

$\bar{P} = (\frac{U_o}{\sqrt{2}})^2/R_L = (\frac{2.313}{\sqrt{2}})^2/1 = 2.673\,mV$

2.7　推导如图 E2.7 电路的电压传递特性 $u_o \sim u_i$，并由此画出输出电压波形。已知 VD_1，VD_2 都为折线化二极管，VD_1：$U_{T1}=0.5V$，$g_1=1mS$；VD_2：$U_{T2}=1V$，$g_2=0.5mS$，$u_i(t)=3\cos\omega t(V)$。

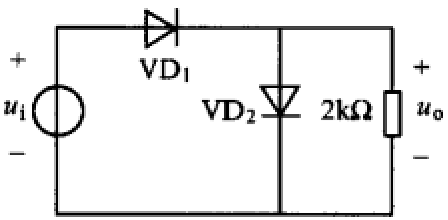
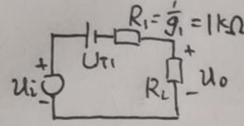


图 E2.7

2.7 ① 当 $u_i<U_{T1}$ 时，VD1、VD2 截止，$u_o=0$

② 当 $u_i>U_{T1}$ 且 $u_o<U_{T2}$ 时，VD1 导通，VD2 截止

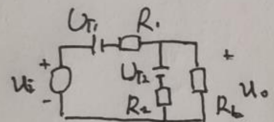


当 $u_o=U_{T2}$ 时，

$$u_i=U_{T1}+U_{T2}+R_1\frac{U_{T2}}{R_L}=0.5+1+1\times\frac{1}{2}=2V$$

$$u_o=(u_i-U_{T1})\frac{R_L}{R_1+R_L}=(u_i-0.5)\frac{2}{1+2}=\frac{2}{3}u_i-\frac{1}{3}\ (V),\ 0.5V<u_i<2V$$

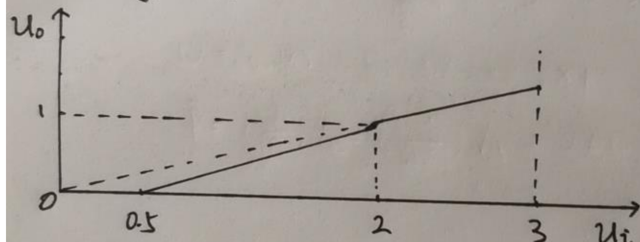
③ 当 $u_i>2V$ 时，VD1、VD2 均导通

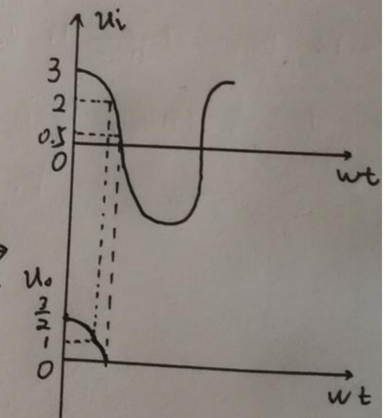


$R_2=\frac{1}{g_2}=2k\Omega$

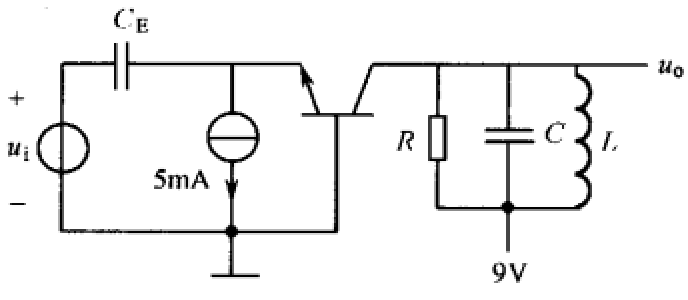
$$\frac{u_i-U_{T1}-u_o}{R_1}=\frac{u_o}{R_L}+\frac{u_o-U_{T2}}{R_2}$$

$$\Rightarrow u_o=\frac{1}{2}u_i$$

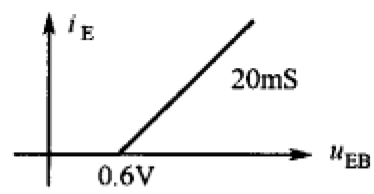




2.17 如图 E2.15 所示为共基极晶体管放大器，晶体管发射结特性如图 E2.15(b)所示。已知 $R=500\Omega$，$L=0.5\mu H$，$C=20nF$，$\alpha\approx1$，$u_i=3\cos\omega_0 t(V)$。求输出电压表达式及其总谐波失真 THD。



(a)



(b)

$$\frac{G_{m1}(\varphi)}{G}=\frac{1}{\pi}(\varphi-\sin\varphi\cos\varphi)$$

2.17 $I_K=I_{E0}=I_p\alpha_0(\varphi)=GU_1(1-\cos\varphi)\frac{\sin\varphi-\varphi\cos\varphi}{\pi(1-\cos\varphi)}=GU_1\frac{\sin\varphi-\varphi\cos\varphi}{\pi}=5mA$

$G=20mS,\ U_1=3V \Rightarrow \varphi=54.50°$

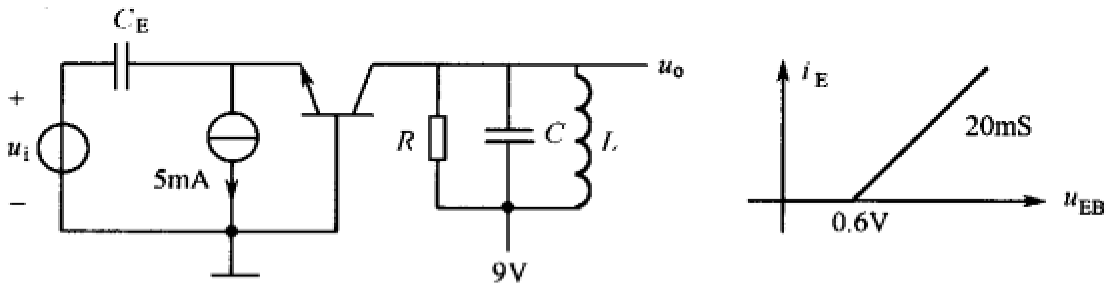
$G_{m1}(\varphi)=\frac{G}{\pi}(\varphi-\sin\varphi\cos\varphi)=\frac{20}{\pi}\left(\frac{54.5}{180}\pi-\sin54.5\cos54.5\right)=3.05mS$

$u_o=9+G_{m1}(\varphi)U_1R\cos10^7t=9+3.05\times3\times0.5\cos10^7t=9+4.58\cos10^7t\ (V)$

$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{0.5\times10^{-6}\times20\times10^{-9}}}=10^7\ rad/s$ $\quad Q_T=\omega_0RC=10^7\times500\times20\times10^{-9}=100$

$D(\varphi)\approx0.528,\ THD=\frac{D(\varphi)}{Q_T}=0.53\%$

2.17 如图 E2.15 所示为共基极晶体管放大器，晶体管发射结特性如图 E2.15(b)所示。已知 $R=500\Omega$，$L=0.5\mu H$，$C=20nF$，$\alpha\approx1$，$u_i=3\cos\omega_0 t(V)$。求输出电压表达式及其总谐波失真 THD。



(a) (b)

注：2.17体现的问题：①交流输入前，$u_{BE}=U_{BEQ}$；交流输入后，$u_{BE}=U_{BE0}+u$，此电路中，U_{BEQ}不等于U_{BE0}，所以不能将折线律模型代入分析，更不能只认为$U_{BE}=0.6V$，因为大信号分析中，管子的导通与否是由直流电平和交流信号共同决定。

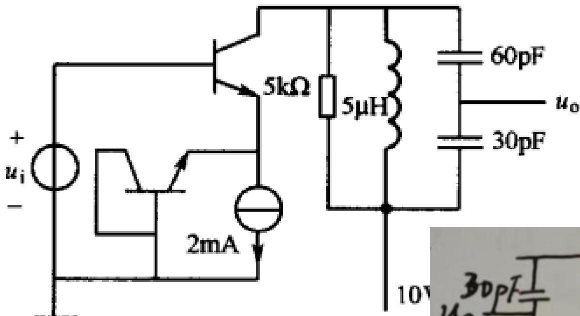
②大家在带公式的时候，一定要先清楚每个量到底代表着什么。陈老师折线律PPT中的

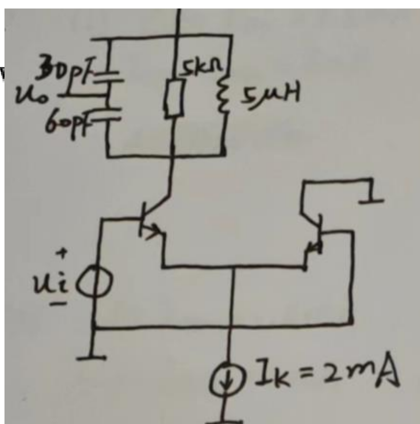
导通范围内：
$$\begin{cases} u_i = U_Q + U_1\cos\omega t \\ i = \dfrac{u_i - U_T}{R} \end{cases}$$

ui其实指的是u_{BE}，U_Q实际指的是u_{BE}中的直流电平，即U_{BE0}。

2.5 在如图 E2.5 电路中，晶体管 $\beta=100$，$u_i=52\cos10^8 t$ (mV)，其他参数见电路图。计算输出电压表达式及其总谐波失真 THD。

【Ans.：$-2.653\cos10^8 t$(V)，THD=0.25%】





注：$g_{mdQ}=\frac{1}{2}\times\frac{\alpha I_K}{2U_T}$

$=\frac{1}{2}g_{mQ}$

差分对小信号跨导

$C=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}}=\frac{1}{\frac{1}{30}+\frac{1}{60}}=20pF$

$\omega=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{5\times10^{-6}\times20\times10^{-12}}}=10^8\ rad/s.$

$Q_T=\omega_0 RC=10^8\times5\times10^3\times20\times10^{-12}$

$=10$

$x=\frac{U_i}{U_T}=\frac{52}{26}=2$ ，$\alpha=\frac{\beta}{1+\beta}\approx0.99$

查表得 $a_1(2)=0.40584$ ，$D(2)=0.02509$

$\therefore G_{m1}(x)=\frac{\alpha I_K}{4U_T}\times\frac{4a_1(x)}{x}$

$=\frac{0.99\times2}{4\times26}\times\frac{4\times0.40584}{2}=15.45\ mS$

$u_o=-\frac{60}{60+30}\times G_{m1}(x)\,u_i R$

$=-\frac{2}{3}\times5k\times15.45\times10^{-3}\times52\times10^{-3}\cos10^8 t$

$=-2.678\cos10^8 t\ (V)$

$\therefore THD=\frac{D(2)}{Q_T}=0.25\%$

2.8 增强型 MOSFET 管的转移特性为：

$$i_D = \begin{cases} \beta_n (u_{GS} - 2)^2 & u_{GS} \geqslant 2\text{V} \\ 0 & u_{GS} \leqslant 2\text{V} \end{cases}$$

式中 $\beta_n = 0.8\text{mA/V}^2$。求下列情况下等效基波跨导 G_{m1}：

（1）$u_{GS} = U_Q + U_1 \cos\omega t = 3 + \cos\omega t$ （V）；

2.8(1). $u_{GSmax} = 4\text{V}$, $u_{GSmin} = 2\text{V}$

工作在完全平方区

$i_D = \beta_n (u_{GS} - 2)^2$

$= 0.8 \times (1 + \cos\omega t)^2$

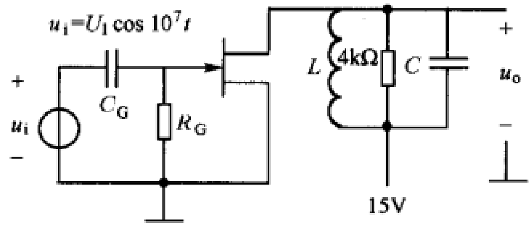
$= 0.8 + 1.6\cos\omega t + 0.8\cos^2\omega t$

$\therefore G_{m1} = \dfrac{I_{D1}}{U_1} = \dfrac{1.6}{1} = 1.6\text{mS}$

*2.10　自生负偏压场效应管放大电路如图 E2.8 所示。场效应管的参数为：$I_{DSS}=6\text{mA}$，$U_P=-4\text{V}$。又知漏极回路的中心频率 $\omega_0=10^7\text{rad/s}$，带宽 $BW=5\times10^5\text{rad/s}$。若已知漏极电流的均值分量为 1.8mA。求：

(1) 回路压降幅度及其总谐波失真 THD；

(2) 场效应管的平均功耗和电压增益。



2.10. (1). 已知 $I_{D0}=1.8mA$，$u_{GS}=U_Q+U_1\cos\omega t=-U_1+U_1\cos10^7t$

$I_{Dp}=I_{DSS}=6mA$，$\alpha_0(\varphi)=\frac{I_{D0}}{I_{Dp}}=\frac{1.8}{6}=0.3$

查表 B.6 知 $\alpha_0(110^\circ)=0.2946$，$\alpha_0(115^\circ)=0.3046$

内插法：$\varphi=110+5\times\frac{0.3-0.2946}{0.3046-0.2946}=112.7^\circ$

$Q_T=\omega_0RC=\frac{\omega_0}{BW}=\frac{10^7}{5\times10^5}=20$，$D(\varphi)=0.3083-\frac{112.7-110}{5}\times(0.3083-0.2884)$
$=0.2976$

$\therefore THD=\frac{D(\varphi)}{Q_T}=\frac{0.2976}{20}=1.488\%$

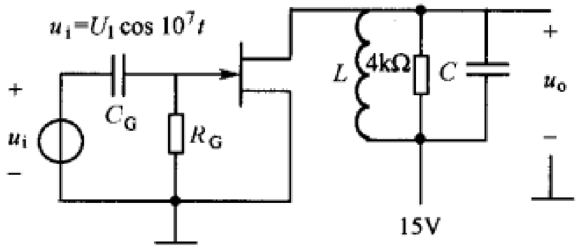
$\alpha_1(\varphi)=0.4665+\frac{112.7-110}{5}\times(0.4739-0.4665)=0.4705$

$U_o=I_{D1}\times R=I_{Dp}\alpha_1(\varphi)\cdot R=6\times0.4705\times4=11.29V$

*2.10 自生负偏压场效应管放大电路如图 E2.8 所示。场效应管的参数为：$I_{DSS}=6\text{mA}$，$U_P=-4\text{V}$。又知漏极回路的中心频率 $\omega_0=10^7\text{rad/s}$，带宽 $BW=5\times10^5\text{rad/s}$。若已知漏极电流的均值分量为 1.8mA。求：

(1) 回路压降幅度及其总谐波失真 THD；

(2) 场效应管的平均功耗和电压增益。



(2) 由 $\cos\varphi=\dfrac{U_P-U_Q}{U_1}=\dfrac{U_P+U_1}{U_1}=1+\dfrac{-4}{U_1}=\cos(112.7^\circ)=-0.3859$

得 $U_1=2.886\text{V}$

$A_v=\left|\dfrac{U_o}{U_1}\right|=\dfrac{11.29}{2.886}=3.912$

$\overline{P}=P_直-P_交=V_{cc}\times I_{D0}-\dfrac{1}{2}\times\dfrac{U_o^2}{R}$

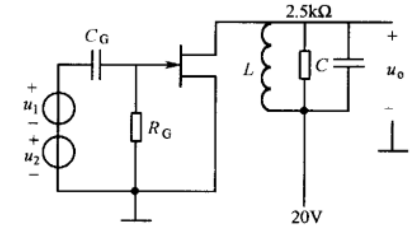
$=15\times1.8\times10^{-3}-\dfrac{1}{2}\times\dfrac{11.29^2}{4000}$

$=11.07\text{mW}$

2.12 在如图 E2.10 所示电路中，场效应管 $I_{DSS}=10\text{mA}$，$U_P=-4\text{V}$；$C_G=0.1\mu\text{F}$，$R_G=1\text{M}\Omega$；回路中心频率为 f_0，$Q_T=20$。输入信号 $u_1=U_1\cos2\pi f_1 t(\text{V})$，$u_2=U_2\cos2\pi f_2 t(\text{V})$。计算以下两种情况下的输出电压表达式：

(1) $U_1=2\text{V}$，$f_1=1.465\text{MHz}$，$U_2=0.2\text{V}$，$f_2=1\text{MHz}$，$f_0=465\text{kHz}$；

(2) $U_1=\frac{8}{3}\text{V}$，$f_1=10\text{MHz}$，$U_2=0.3\text{V}$，$f_2=250\text{kHz}$，$f_0=f_1$。



2.12.(1) $U_1=2V=-U_Q$

$u_{GS}=U_Q+u_1+u_2=-2+2\cos2\pi f_1 t+0.2\cos2\pi f_2 t\ (V)$

$BW=\frac{\omega_0}{Q_T}=\frac{2\pi f_0}{Q_T}=\frac{2\pi\times465k}{20}=46.5k\pi\ rad/s \Rightarrow$ 下混频.

求时变直流工作点.

$u_{GS}=-2+2\cos2\pi f_1 t\ (V)$，$\varphi=\arccos\frac{U_P-U_Q}{U_1}=\arccos\left(\frac{-4+2}{2}\right)=180^\circ$

$$i_D=\begin{cases} I_{DSS}\left(1-\frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2, & u_{GS}\geq-4 \\ 0, & u_{GS}<-4\end{cases}=\begin{cases}10\times\left(1+\frac{u_{GS}}{4}\right)^2, & u_{GS}\geq-4 \\ 0, & u_{GS}<-4\end{cases}$$

$$g(\omega,t)=\frac{di_D}{du_{GS}}=\begin{cases}5\times\left(1+\frac{u_{GS}}{4}\right), & u_{GS}\geq-4 \\ 0, & u_{GS}<-4\end{cases}\Bigg|_{u_{GS}=-2+2\cos2\pi f_1 t}$$

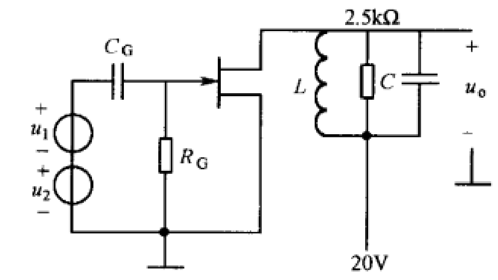
$$=\begin{cases}\frac{5}{2}+\frac{5}{2}\cos2\pi f_1 t \\ 0\end{cases}$$

$\therefore g_p=5\,mS$，$g_1=g_p\alpha_1(\varphi)=5\times0.5=2.5\,mS$

2.12 在如图 E2.10 所示电路中，场效应管 $I_{DSS}=10\text{mA}$，$U_P=-4\text{V}$；$C_G=0.1\mu\text{F}$，$R_G=1\text{M}\Omega$；回路中心频率为 f_0，$Q_T=20$。输入信号 $u_1=U_1\cos2\pi f_1t(\text{V})$，$u_2=U_2\cos2\pi f_2t(\text{V})$。计算以下两种情况下的输出电压表达式：

(1) $U_1=2\text{V}$，$f_1=1.465\text{MHz}$，$U_2=0.2\text{V}$，$f_2=1\text{MHz}$，$f_0=465\text{kHz}$；

(2) $U_1=\frac{8}{3}\text{V}$，$f_1=10\text{MHz}$，$U_2=0.3\text{V}$，$f_2=250\text{kHz}$，$f_0=f_1$。



$\therefore I_{IF}=\frac{1}{2}g_1U_2=\frac{1}{2}\times2.5\times0.2=0.25\text{mA}$

$\therefore$ 输出 $u_o=20-I_{IF}\times R\cos2\pi f_0t$

$=20-0.25\times2.5\cos2\pi f_0t$

$=20-0.625\cos2\pi f_0t\ (\text{V})$

(2) $u_{GS}=-\frac{8}{3}+\frac{8}{3}\cos2\pi f_1t+0.3\cos2\pi f_2t$

$BW=\frac{2\pi f_0}{Q_T}=\frac{2\pi\times10M}{20}=\pi M\ \text{rad/s}\approx500\text{kHz}=2f_2$

$\therefore$ 输出包括 f_1，f_1+f_2，f_1-f_2 的频率分量.

不同频率分量对应负载阻抗不同.

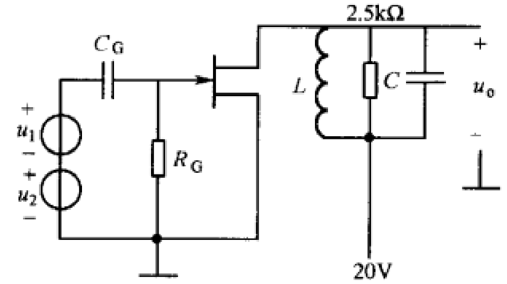
$f_1\pm f_2$ 在通带边缘，阻抗为 $\left|\frac{R}{\sqrt{2}}\right|$ 且存在 $\pm\frac{\pi}{4}$ 的相移.

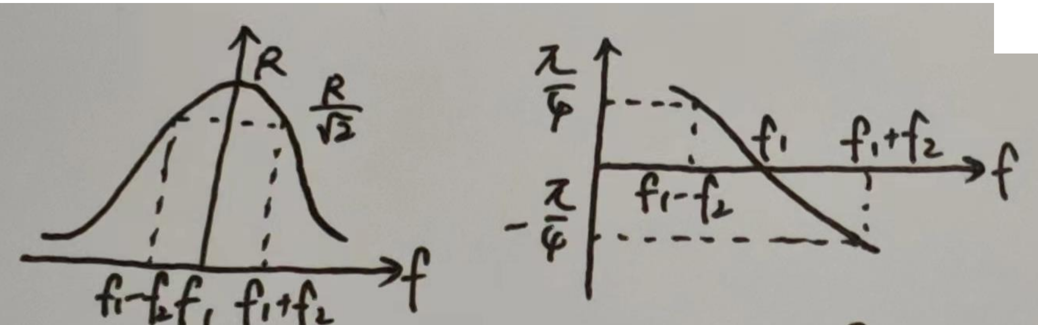
Chapter 2

2.12 在如图 E2.10 所示电路中，场效应管 $I_{DSS}=10\text{mA}$，$U_P=-4\text{V}$；$C_G=0.1\mu\text{F}$，$R_G=1\text{M}\Omega$；回路中心频率为 f_0，$Q_T=20$。输入信号 $u_1=U_1\cos 2\pi f_1 t(\text{V})$，$u_2=U_2\cos 2\pi f_2 t(\text{V})$。计算以下两种情况下的输出电压表达式：

(1) $U_1=2\text{V}$，$f_1=1.465\text{MHz}$，$U_2=0.2\text{V}$，$f_2=1\text{MHz}$，$f_0=465\text{kHz}$；

(2) $U_1=\frac{8}{3}\text{V}$，$f_1=10\text{MHz}$，$U_2=0.3\text{V}$，$f_2=250\text{kHz}$，$f_0=f_1$。



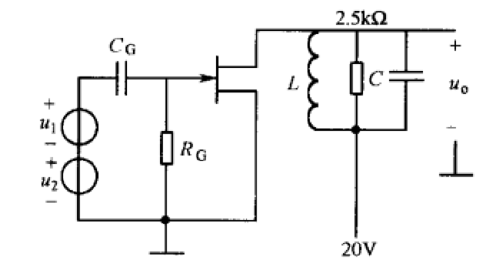


$$\varphi=\arccos\frac{U_P-U_Q}{U_1}=\arccos\left(\frac{-4+\frac{8}{3}}{\frac{8}{3}}\right)=120^\circ$$

2.12 在如图 E2.10 所示电路中，场效应管 $I_{DSS}=10\text{mA}$，$U_P=-4\text{V}$；$C_G=0.1\mu\text{F}$，$R_G=1\text{M}\Omega$；回路中心频率为 f_0，$Q_T=20$。输入信号 $u_1=U_1\cos 2\pi f_1 t(\text{V})$，$u_2=U_2\cos 2\pi f_2 t(\text{V})$。计算以下两种情况下的输出电压表达式：

(1) $U_1=2\text{V}$，$f_1=1.465\text{MHz}$，$U_2=0.2\text{V}$，$f_2=1\text{MHz}$，$f_0=465\text{kHz}$；

(2) $U_1=\frac{8}{3}\text{V}$，$f_1=10\text{MHz}$，$U_2=0.3\text{V}$，$f_2=250\text{kHz}$，$f_0=f_1$。



$I_{D1} = I_{DP}\alpha_1(\varphi) = 10\times\alpha_1(120^\circ) = 10\times 0.4801 = 4.8\text{mA}$

注意此处为平方律表

$U_{f_1} = I_{D1}\times R = 4.8\times 2.5 = 12\text{V}$

$g_P = 5\times\left[1+\frac{1}{4}\times\left(-\frac{8}{3}+\frac{8}{3}\cos 2\pi f_1 t\right)\right]\Big|_{\cos 2\pi f_1 t=1} = 5\text{mS}$

$g_1 = g_P\times\alpha_1(\varphi) = 5\times\alpha_1(120^\circ) = 5\times 0.5363 = 2.682\text{mS}$

注意此处为折线律表.

$\therefore I_{IF} = \frac{1}{2}g_1 U_2 = \frac{1}{2}\times 2.682\times 0.3 = 0.4023\text{mA}$

$U_{f_1+f_2} = U_{f_1-f_2} = \frac{I_{IF}\times R}{\sqrt{2}} = \frac{0.4023\times 2.5}{\sqrt{2}} = 0.711\text{V}$

$\therefore u_o = 20 - U_{f_1}\cos 2\pi f_1 t - U_{f_1+f_2}\left[\cos\left(2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(2\pi f_1 t + 2\pi f_2 t - \frac{\pi}{4}\right)\right]$

$= 20 - 12\cos 2\pi f_1 t - 0.711\cos\left[2\pi(f_1+f_2)t - \frac{\pi}{4}\right] - 0.711\cos\left[2\pi(f_1-f_2)t + \frac{\pi}{4}\right]$