第四章 正弦振荡器

4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

4.2 振荡器分析预备知识

4.3 正弦振荡器分析举例

4.4 石英晶体正弦波振荡器

4.5 阻容振荡器（RC振荡器）

4.3 正弦振荡器分析举例

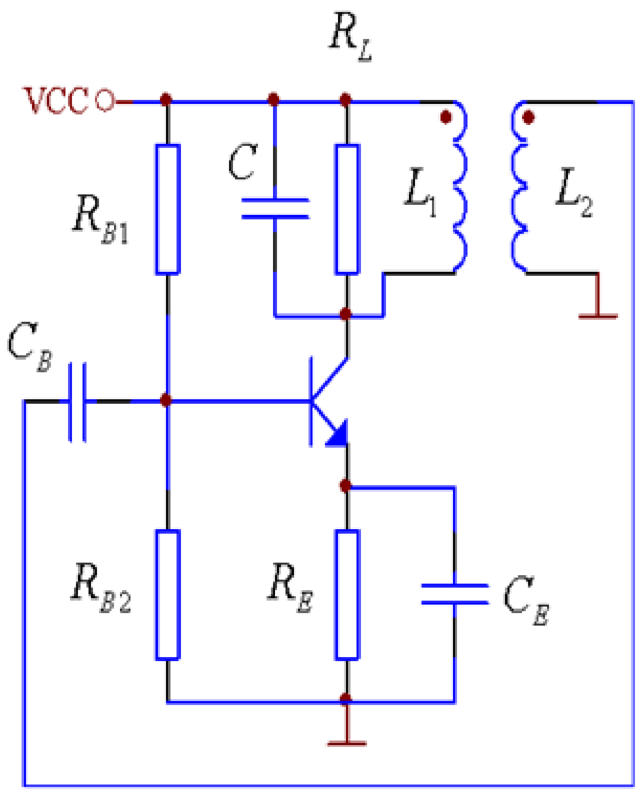
4.3.1变压器反馈式OSC

$$\beta = 50,\ C = 1000PF,\ L_1 = 4uH$$

$$L_2 = 1uH, M = 0.4uH, V_{CC} = 9V,$$

$$R_{B1} = 47K\Omega\ , R_{B2} = 22K\Omega$$

$$R_E = 2.2K\Omega\ , R_L = 22K\Omega$$

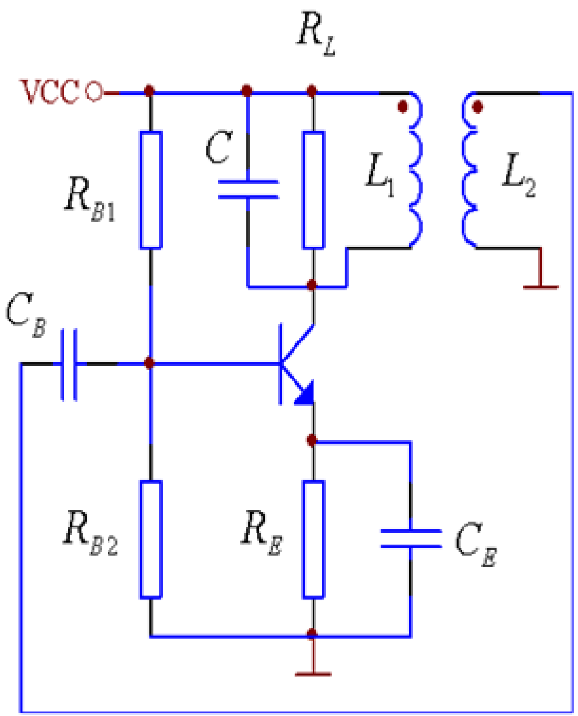


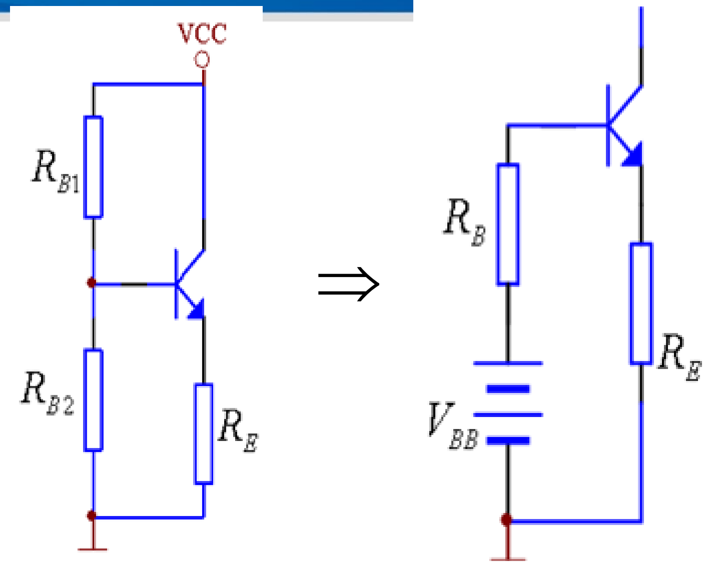
分析步骤：

1. 判断电路有无错误；
2. 画直流电路，计算I_{EQ}和g_{mQ}；
3. 画交流等效电路，判断相位平衡条件和起振幅值条件；
4. 计算f_{osc}和U_{osc}。

4.3 正弦振荡器分析举例

2. 画直流电路，计算I_{EQ}和g_{mQ}；





$$R_B = R_{B1} // R_{B2} = 14.986K$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} V_{CC} = 2.87V$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB}-0.7}{R_E+(1-\alpha)R_B} = 0.87mA$$

$$\therefore g_{mQ} = \frac{\alpha I_{EQ}}{U_r} = 32.805ms$$

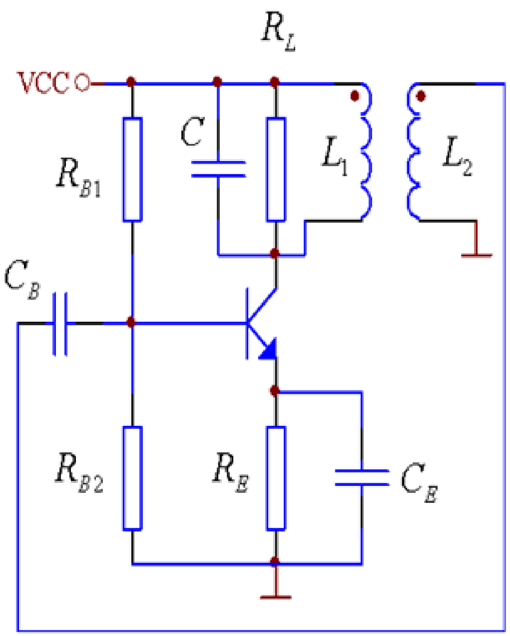
判断晶体管有无合适静态工作点

NPN：$U_C > U_B > U_E$

PNP：$U_C < U_B < U_E$

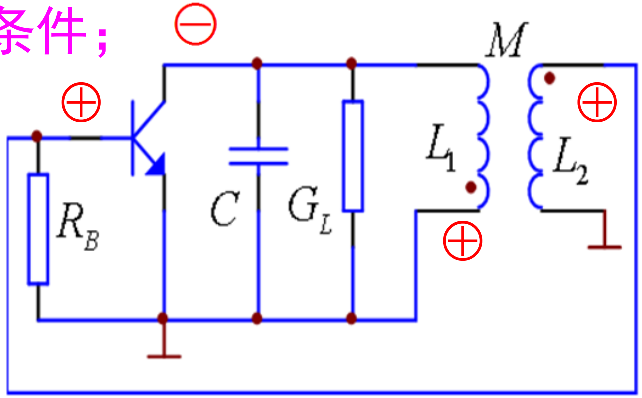
4. 3 正弦振荡器分析举例

3. 画交流等效电路，判断相位平衡条件和起振幅值条件；

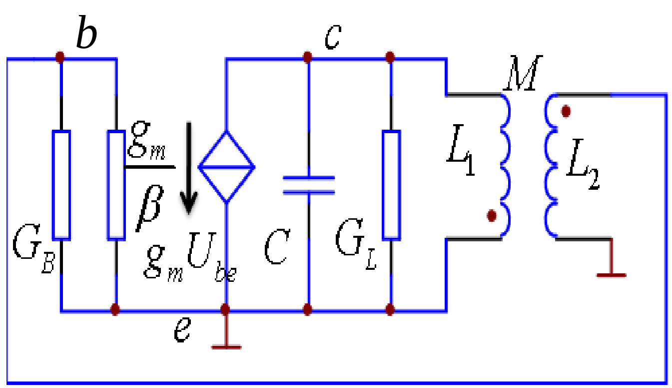


①画交流通路

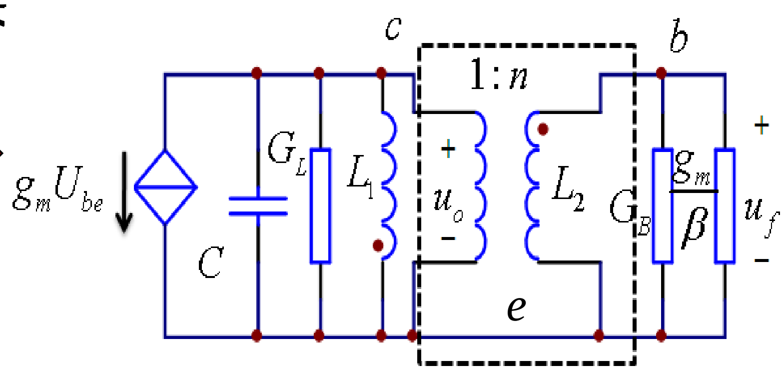
判断相位平衡条件
（瞬时极性法）

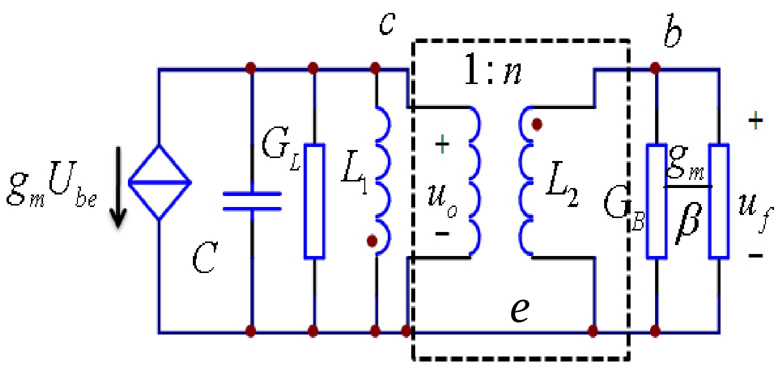


②用晶体管简化模型取代晶体管，得到交流等效电路；



③根据阻抗变换关系进一步等效。





假定接入口电抗L_2的等效 $Q_* > 10$

$$Q_* = \frac{1}{\omega_0 L_2 (G_B + \frac{g_m}{\beta})}$$

$$L = L_1, n = \frac{M}{L_1} = 0.1, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}$$

$$Q_T = \frac{\omega_0 C}{G_L + n^2 (G_B + \frac{g_m}{\beta})}$$

设$g_\Sigma = G_L + n^2 (G_B + \frac{g_m}{\beta})$

分析起振的幅值条件

$$\left.\begin{aligned} T = \dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_{be}} \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_O} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_{be}} \\ \dot{U}_f = n\dot{U}_O = n g_m \dot{U}_{be} / g_\Sigma \end{aligned}\right\}$$

$$\Rightarrow \dot{A}\dot{F} = n g_m / g_\Sigma > 1$$

$\therefore$ 起振幅度条件为：$n g_m / g_\Sigma > 1$

$$\frac{n g_m}{g_\Sigma} = \frac{n g_m}{G_L + n^2 (G_B + \frac{g_m}{\beta})} > 1$$

$$\Rightarrow g_m > \frac{G_L + n^2 G_B}{n(1 - n/\beta)} = g_{m,\min} = 10.037ms$$

$g_{mQ} > g_{m,\min}$，故本电路满足起振的幅度条件

4. 3 正弦振荡器分析举例

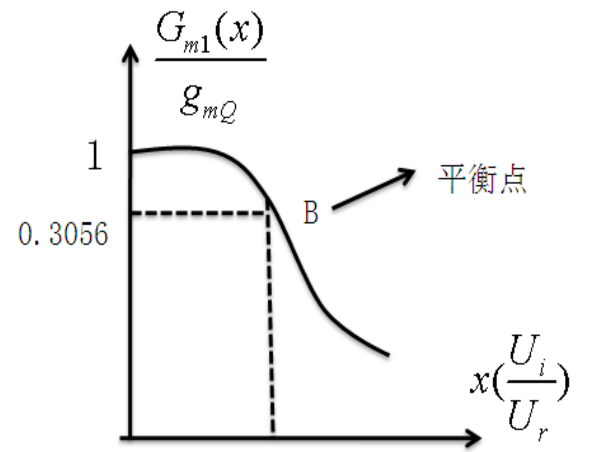
中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

4. 计算f_{osc}和U_{osc}。

①幅度U_{osc} 自限幅特性

$$U_i\uparrow\rightarrow G_{m1}(x)\downarrow$$ 当$G_{m1}(x)=g_{m,\min}$，$AF=1$

振荡达到平衡状态



平衡状态时 $$\frac{G_{m1}(x)}{g_{mQ}}=\frac{g_{m,\min}}{g_{mQ}}=\frac{10.027}{32.805}=0.30565$$

分压式偏置 $$\frac{G_{m1}(x)}{g_{mQ}}=[1+\frac{\ln I_o(x)}{x_\lambda}]\frac{2I_1(x)}{xI_o(x)}$$ $$x_\lambda=\frac{U_\lambda}{U_r}=\frac{2.87-0.7}{0.026}=83.4615$$

查附录B. 1, B. 2得:

x=6: $$\frac{G_{m1}(x)}{g_{mQ}}=[1+\frac{4.208}{83.46}]\times 0.30412=0.3195$$

x=7: $$\frac{G_{m1}(x)}{g_{mQ}}=[1+\frac{5.128}{83.46}]\times 0.26444=0.2806$$

4. 3 正弦振荡器分析举例

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

内插得：

$$0.3056 = 0.3195 + \frac{0.2806 - 0.3195}{7-6}(x-6) \Rightarrow x = 6.36 \qquad n = \frac{M}{L_1} = \frac{0.4}{4} = 0.1$$

$$\therefore x = \frac{U_f}{U_r} = \frac{nU_{OSC}}{U_r} \Rightarrow U_{OSC} = \frac{xU_r}{n} = \frac{6.36}{0.1} \times 0.026 = 1.653V$$

②振荡频率 $$\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}} = 10^7 \, rad/s$$

平衡状态

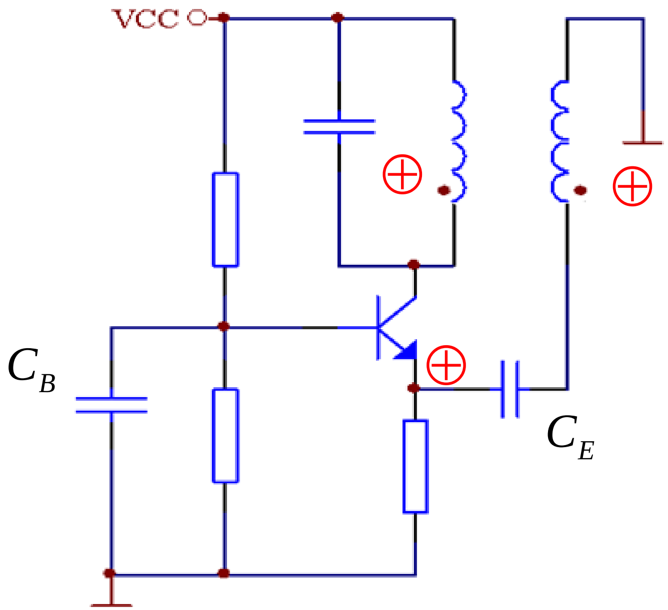
$$Q_* = \frac{1}{\omega_{osc} L_2 (G_B + \frac{g_m}{\beta})} = 374 >> 10$$

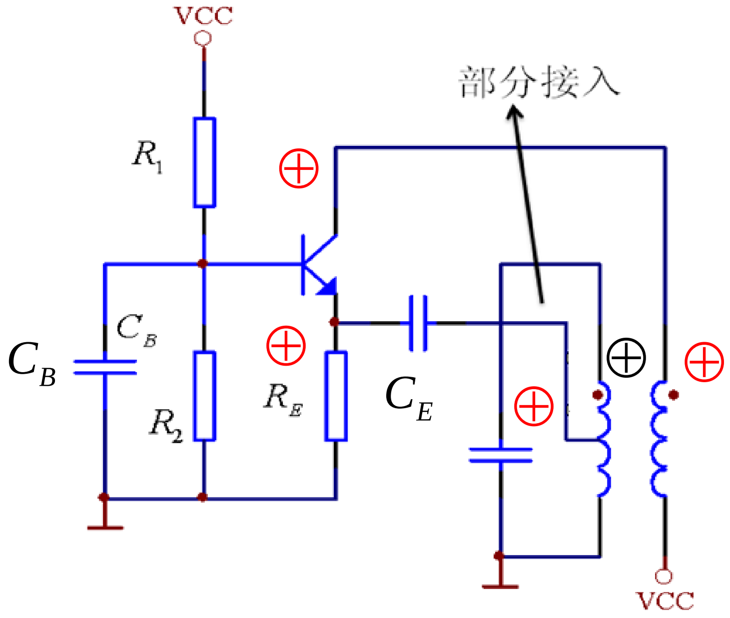
$$Q_T = \frac{1}{\omega_{osc} L_1 (G_L + n^2 (G_B + \frac{g_m}{\beta}))} = 25 >> 10$$

可见以上分析是合理的

4.3 正弦振荡器分析举例

瞬时极性法举例

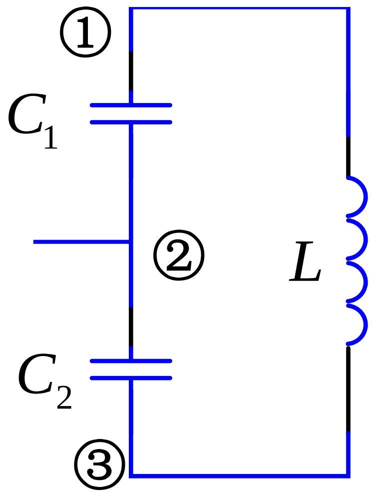


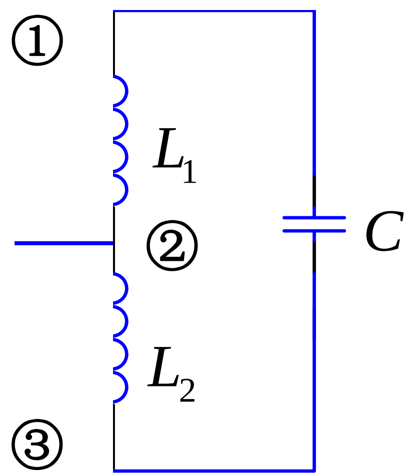


电容（电感）三点式相位关系:

①中间点交流到地，两头相位相反；

②两头其中一点交流到地，另两点相位相同。



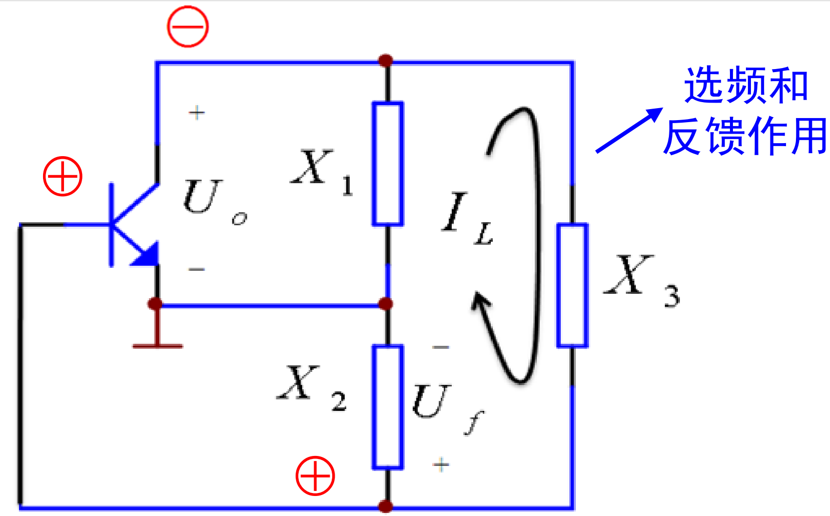


4.3 正弦振荡器分析举例

- 作业：4.1, 4.2, 4.3, 4.4

4.3 正弦振荡器分析举例

4.3.2 三点式OSC（产生几百MHz的高频信号）



在晶体管（场效应管）的3个电极间分别接上一个电抗而构成的振荡电路，其交流通路如图所示。

1. 相位平衡条件分析

谐振条件（形成正反馈，相位平衡条件）

也可用瞬时极性法判断

共射组态：射同基反原则

$$X_1+X_2+X_3=0 \Rightarrow X_3=-(X_1+X_2)$$

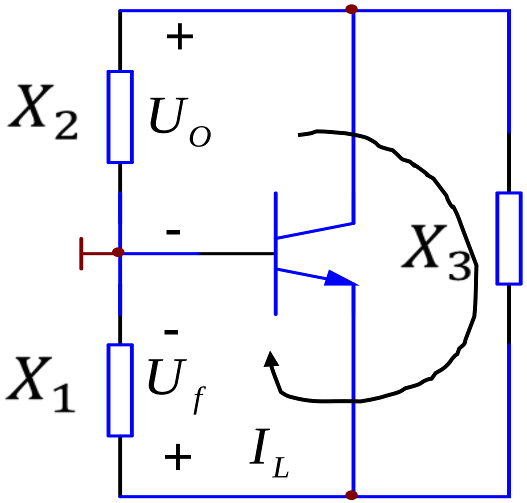
$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_f &= \dot{I}_L\, jX_2 \\ \dot{U}_o &= -jX_1\,\dot{I}_L\end{aligned}\right\} \Rightarrow F=\frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}=-\frac{X_2}{X_1}<0 \Rightarrow \frac{X_2}{X_1}>0,\ \mathrm{X_1,\ X_2}\text{性质相同}$$

X_3与$\mathrm{X_1, X_2}$性质相反。

三点式振荡电路组成法则：与发射极相接的为两个同性质电抗，与基极相接的为异性电抗，必满足相位平衡条件，实现正反馈。

4.3 正弦振荡器分析举例

共基组态

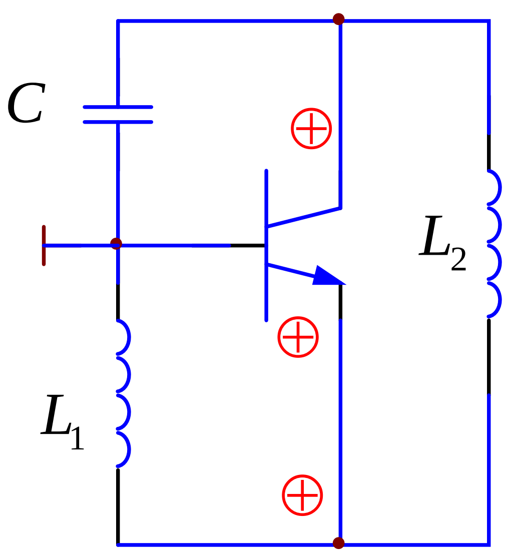


$$X_1+X_2+X_3=0 \Rightarrow X_3=-(X_1+X_2)$$

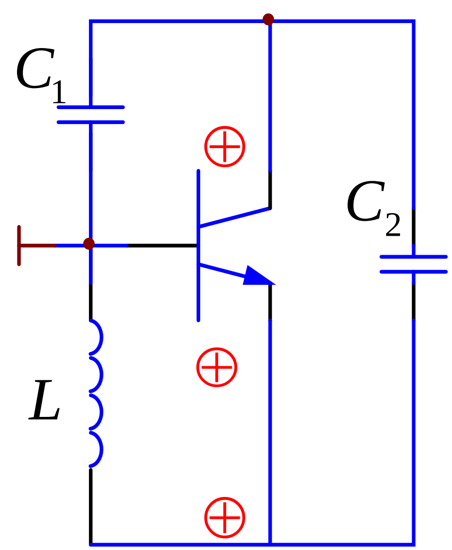
$$\Rightarrow F=\frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}=\frac{jX_1 I}{-jX_2 I}=-\frac{X_1}{X_2}>0$$

$\Rightarrow$ X_1, X_2性质相反

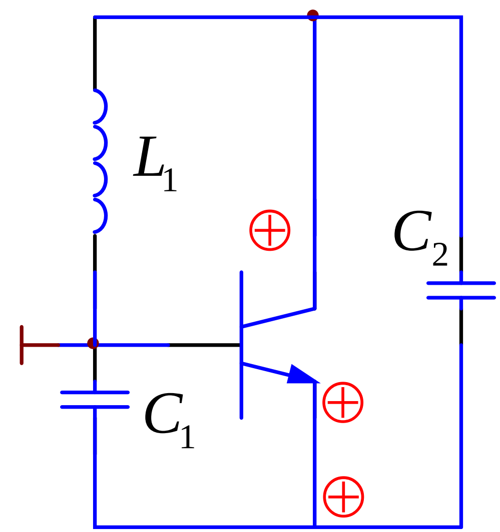
即基反应严格保证



射同



射反

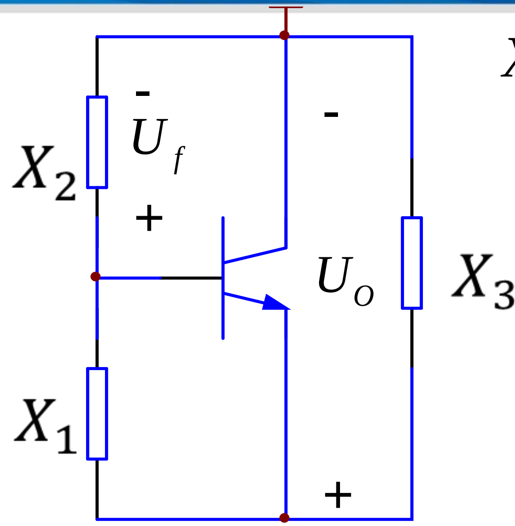


射同

4.3 正弦振荡器分析举例

共集组态

对于共集组态，有$A<1$，因此需$F>1$才能满足起振幅值条件

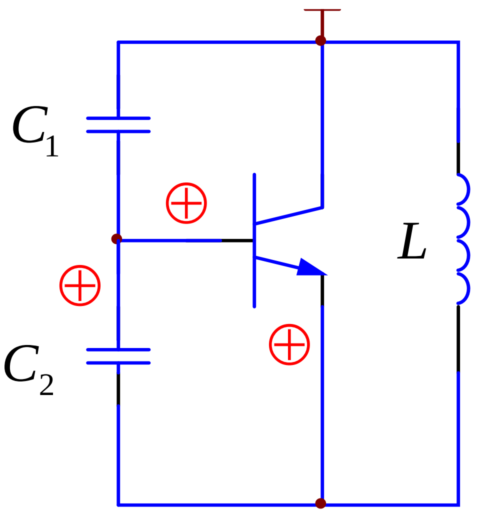


$$X_1+X_2+X_3=0 \Rightarrow X_1=-(X_3+X_2)$$

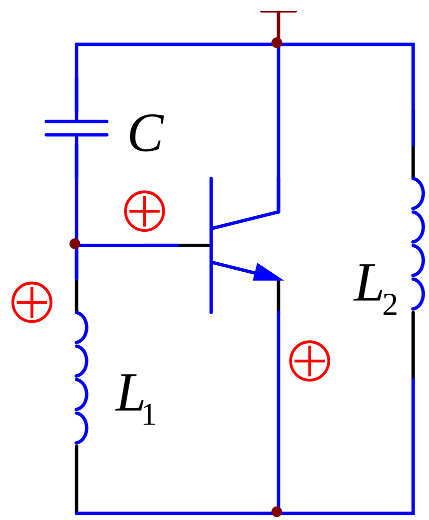
$$\Rightarrow F=\frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}=\frac{jX_2 I}{-jX_3 I}=-\frac{X_2}{X_3}>0$$

$\Rightarrow$ X_2, X_3性质相反

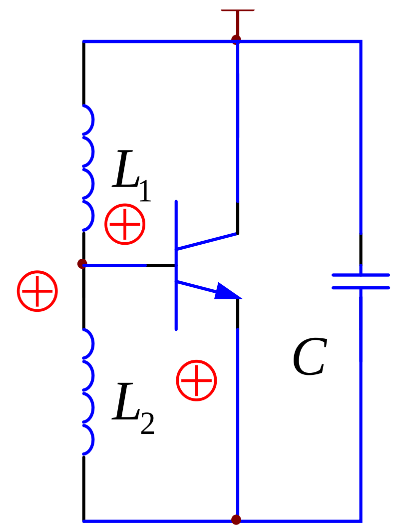
即集反应严格保证



$$F=\frac{C_2}{C_1+C_2}<1 \times$$



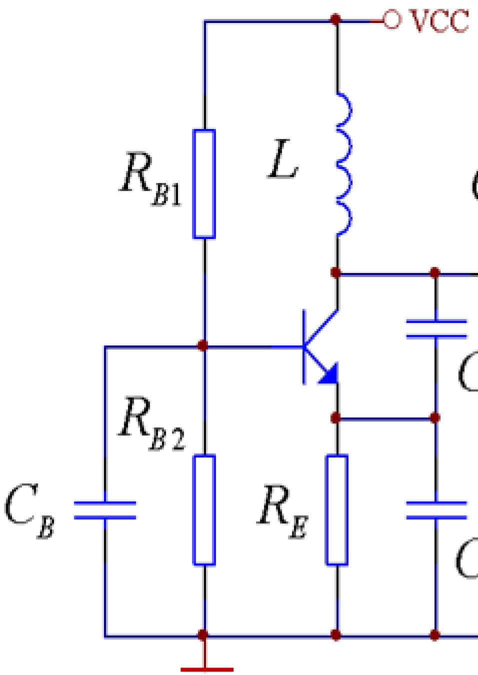
$$F=\frac{1}{\omega^2 L_2 C}\text{可}>1$$



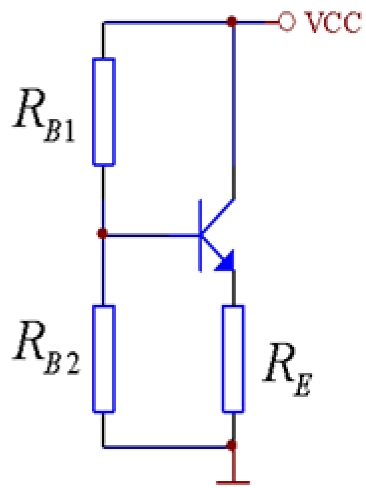
$$F=\frac{L_1}{L_1+L_2}<1 \times$$

4.3 正弦振荡器分析举例

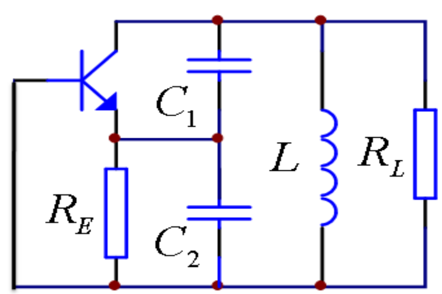
2. 电容三点式振荡电路：设原理电路中， V_{CC}=5V， L=$5uH$, $\alpha = 0.98$
C_1=1200PF， C_2=4800PF，R_{B1}=22K, R_{B2}=18K, R_E=2.2K, R_L=1.5K。



原理电路



直流通路



交流通路

（1）静态分析

$$I_{EQ} = \frac{\dfrac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}V_{CC} - 0.7}{R_E + (1-\alpha)R_B} = 0.6464mA$$

$$g_{mQ} = \frac{\alpha I_{EQ}}{U_r} = 24.363ms$$

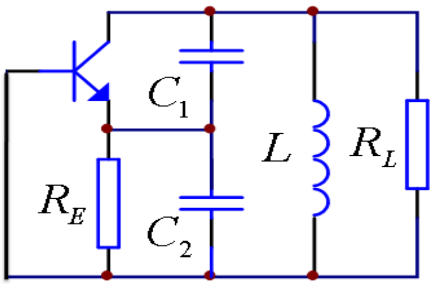
（2）交流分析

相位平衡条件：满足射同基反原则

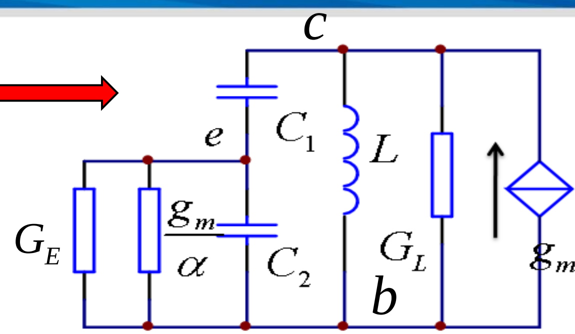
振荡频率：

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 2.297MHz$$

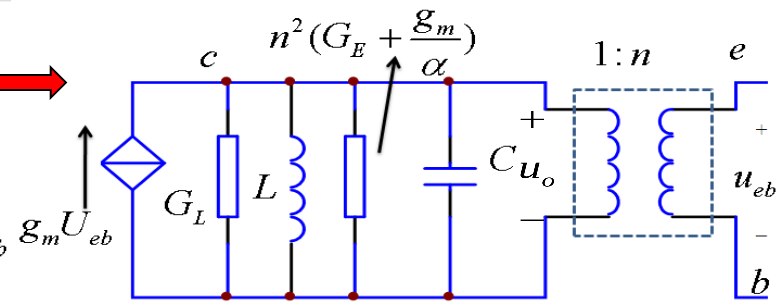
4.3 正弦振荡器分析举例



交流通路



交流等效电路



阻抗变换后的交流等效电路

$$g_\Sigma = G_L + n^2(G_E + \frac{g_m}{\alpha}) \qquad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 960pF \qquad n = \frac{C}{C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 0.2$$

$$AF = \frac{U_f}{U_{eb}} = \frac{nU_o}{U_{eb}} = \frac{ng_m}{g_\Sigma} > 1 \text{ 或} g_m > \frac{G_L + n^2 G_E}{n(1 - n/\alpha)} = 4.3023ms = g_{m,\min} < g_{mQ}$$

满足起振幅度条件

平衡状态: $\frac{G_{m1}(x)}{g_{mQ}} = \frac{g_{m,\min}}{g_{mQ}} = \frac{4.3023}{24.363} = 0.1766 \Rightarrow x = 12.87$

振荡幅值:

分析可靠

$$\therefore U_o = x\frac{0.026}{n} = 1.673V \qquad Q_* = \frac{\omega_{osc} C_2}{G_E + g_m/\alpha} = 14.3 > 10 \qquad Q_T = \frac{\omega_{osc} C}{g_\Sigma} = 16.1 > 10$$

4.3 正弦振荡器分析举例

（3）电容三点式电路优缺点

优点： a. 反馈信号取自电容两端，电容对高次谐波呈现较小的阻抗，故振荡波形好，振荡频率可以很高，只要减小电容，就能提高振荡频率，一般可达100 MHz以上。

b. 放大器中有源器件的正向传输延迟 $\varphi_f < 0$，振荡频率越大，$|\varphi_f|$越大。$\varphi_{\dot{F}}$ 与φ_f 相互补偿，使 $\varphi_{fF} = \varphi_f + \varphi_F$ 较小，有利于提高振荡频率的稳定性，f_{osc}靠近RLC谐振频率。

$$\dot{F} = \frac{\dfrac{1}{j\omega C_2 + G_E + g_m/\alpha}}{\dfrac{1}{j\omega C_1} + \dfrac{1}{j\omega C_2 + G_E + g_m/\alpha}} = \frac{j\omega C_1}{j\omega(C_1 + C_2) + G_E + g_m/\alpha}$$

$$\Rightarrow \varphi_{\dot{F}} = \frac{\pi}{2} - arctg\frac{\omega(C_1 + C_2)}{G_E + g_m/\alpha} > 0$$

缺点：

a. 极间电容对f_{osc}有影响，加大C_1、C_2可降低极间电容影响。若同时要保证f_{osc}，将要降低L，而小容量电感制作困难，匝数小，磁损厉害，Q值低，不利于f_{osc}的稳定；

b. 调谐不方便，C_1、C_2要同时改变；

c. 极间电容接入系数大，外接阻抗影响f_{osc}的稳定性。

$$n_1 = \frac{C}{C_1}, \qquad n_2 = \frac{C}{C_2}, \qquad n_1 + n_2 = 1$$

4.3 正弦振荡器分析举例

3. 改进型电容三点式振荡电路

（1）Clapp电路　$C_3 << C_1, C_2$

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\approx\frac{1}{C_3}$$

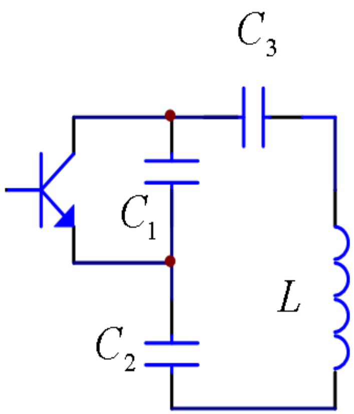
$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\approx\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$$

$$n_1=\frac{C}{C_1}\approx\frac{C_3}{C_1}\text{小}\qquad n_2=\frac{C}{C_2}\approx\frac{C_3}{C_2}\text{小}$$

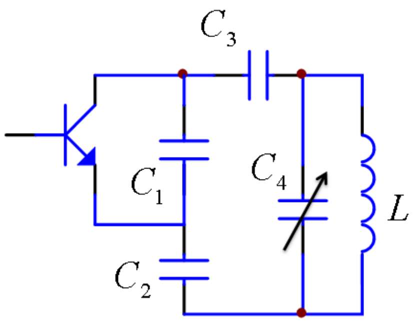
$\because$ 极间电容接入效应为$n_1^2 C_{ce}, n_2^2 C_{b'e}$

$\therefore$ 极间电容的影响变小

$$g_{m,\min}=\frac{G_L+n^2 G_E}{n(1-n/\alpha)}$$



Clapp电路



Siller电路

（2）Siller电路：　C_3，C_4 <<C_1，C_2，通过C_4调节频率。

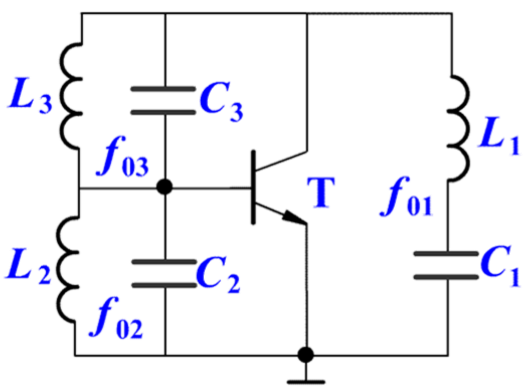
优点：改变C_4不影响任何其它接入系数。所有波段式电容三点式电路均采用此电路。

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3+C_4)}}$$

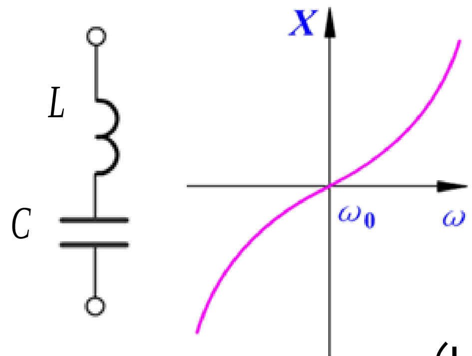
缺点：C_3减小时，接入系数变小，$g_{m,\min}$变大。在改变C_3调整频率时，有可能不满足起振幅度条件而停振。

4.3 正弦振荡器分析举例

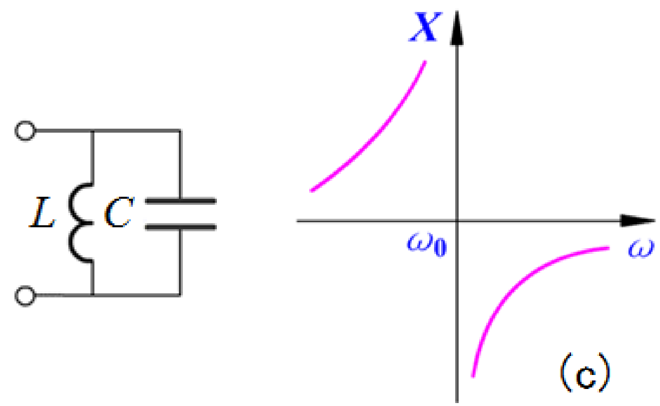
复合电抗举例：图(a)示为三回路振荡器交流通路，f_{01}，f_{02}，f_{03} 分别为三个回路的固有谐振频率，写出它们之间能满足相位平衡条件的两种关系式，并指出两种情况下振荡频率处在什么范围内。



(a)



(b)



(c)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

串联回路：

$$Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = jX \Rightarrow \begin{cases} \omega > \omega_0,\ X > 0,\ \text{呈感性；} \\ \omega < \omega_0,\ X < 0,\ \text{呈容性。} \end{cases}$$

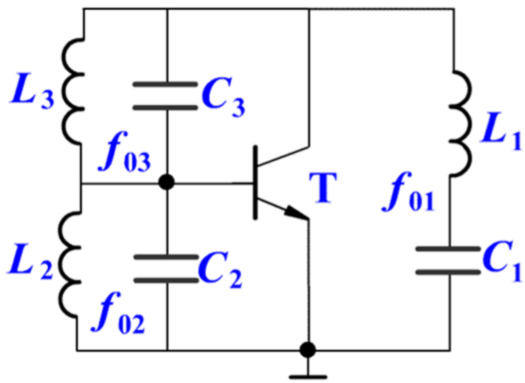
见图(b)

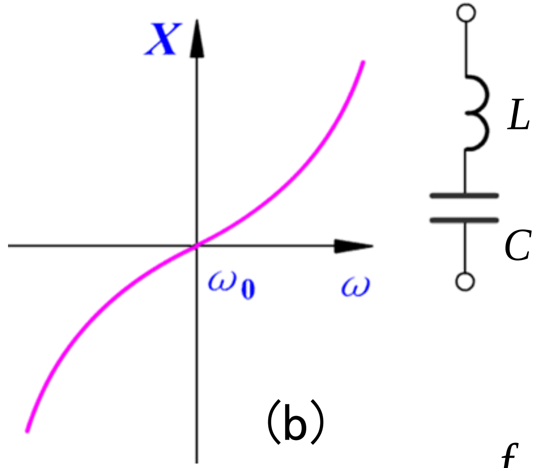
并联回路：

$$Z = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} = j\frac{1}{(\frac{1}{\omega L} - \omega C)} = jX \Rightarrow \begin{cases} \omega > \omega_0,\ X < 0,\ \text{呈容性；} \\ \omega < \omega_0,\ X > 0,\ \text{呈感性。} \end{cases}$$

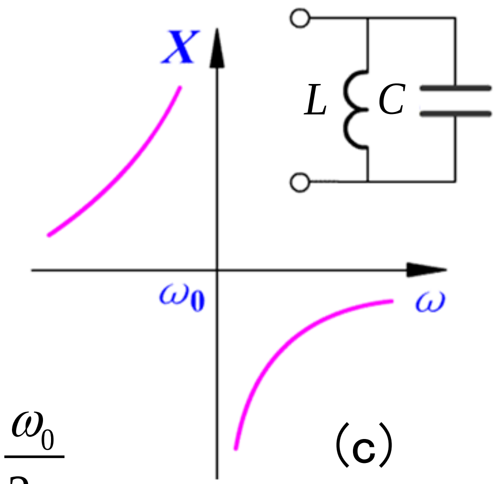
见图(c)

4.3 正弦振荡器分析举例





(b)



(c)

$$f_0=\frac{\omega_0}{2\pi}$$

1．若构成电容三点式电路

L_1C_1、L_2C_2 回路呈容性失谐；L_3C_3 回路呈感性失谐。

$$f_{o2}<f_{0SC}<f_{o1} \qquad f_{0SC}<f_{o3}$$

2．若构成电感三点式电路

L_1C_1、L_2C_2 回路呈感性失谐；L_3C_3 回路呈容性失谐。

$$f_{o1}<f_{0SC}<f_{o2} \qquad f_{0SC}>f_{o3}$$

作业：

（1）4.6，其中（5）中的“若去掉C5，还能满足起振幅度条件，RE最大允许值为何？”无需回答；

（2）4.7，其中（3）无需回答；

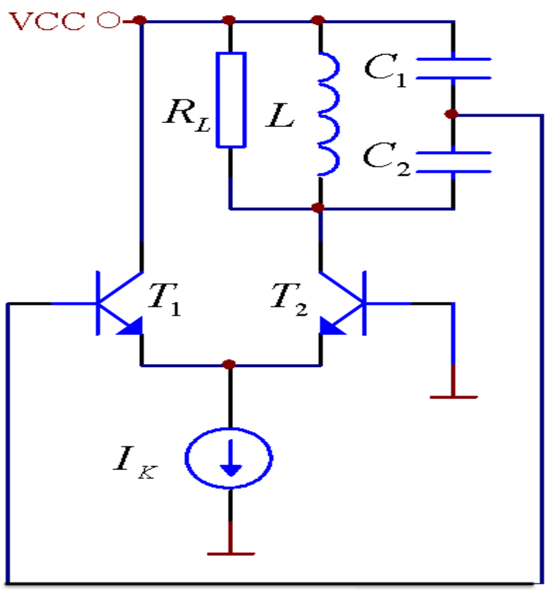
（3）4.9，4.10。

3. 差分三点式振荡电路

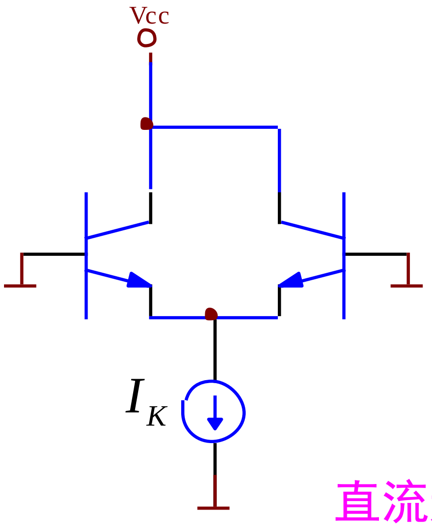
$L = 0.1uH, C_{b'e} = 20pF, \alpha = 0.98, I_K = 2mA,$

$C_1 = 7500pF, C_2 = 2500pF, R_L = 1K\Omega$。

试计算U_{osc}, f_{osc}



（1）直流分析

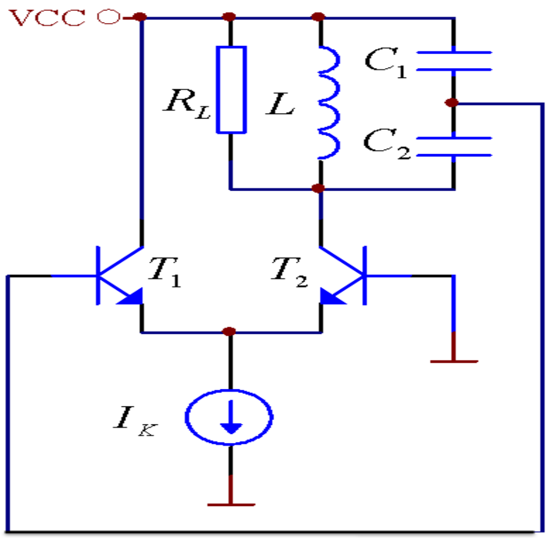


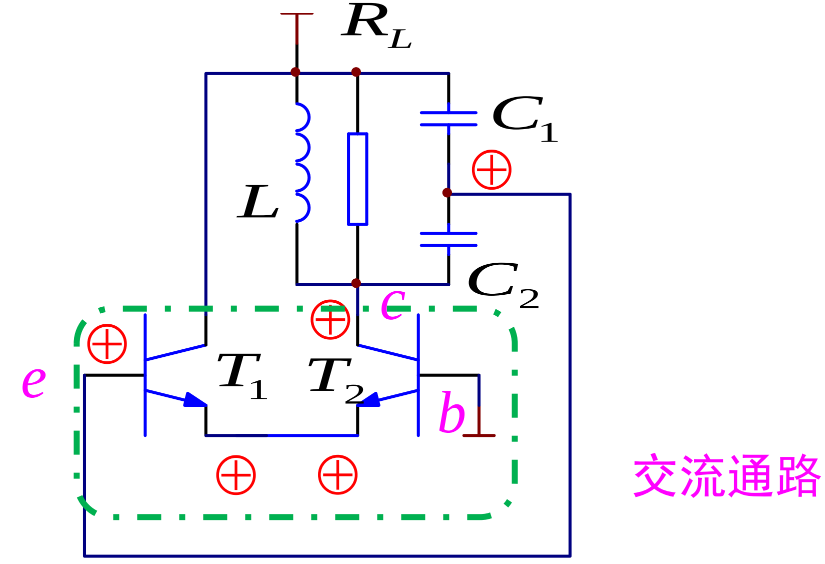
$$I_{EQ} = \frac{1}{2} I_K = 1mA$$

$$g_{mdQ} = \frac{1}{2} g_{mQ} = \frac{1}{2} \frac{\alpha I_{EQ}}{U_r} = \frac{1}{4} \frac{\alpha I_K}{U_r} = 18.846ms$$

4.3 正弦振荡器分析举例

（2）交流分析





差分对为射极跟随器和共基放大器的级联，T_1-T_2可看作一复合管：

T_1-b_1为等效器件的发射极；T_2-b_2为基极；T_2-c_2为集电极；因此为共基组态。

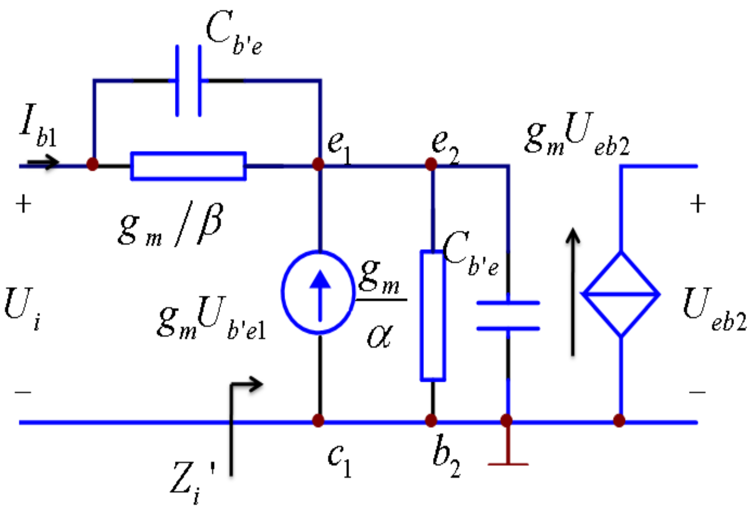
输入信号由发射极跟随后作为共基极T_2的输入，T_2将其放大后由C_1、C_2分压后反馈到T_1基极。

相位平衡条件：满足射同基反原则

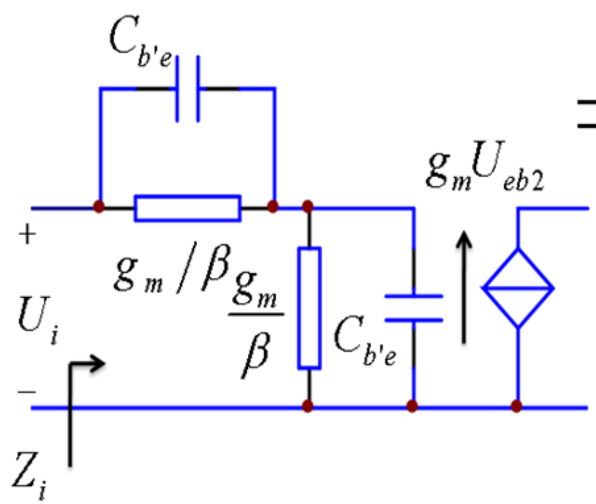
4.3 正弦振荡器分析举例

①差分对输入阻抗

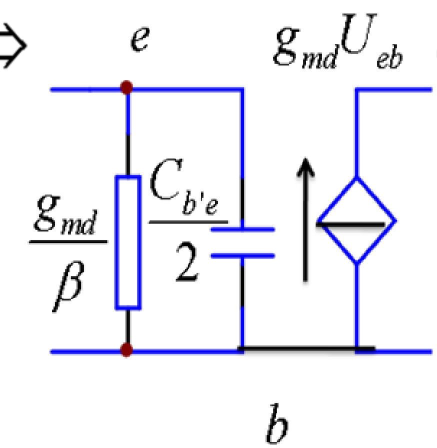
等效电路



⇒



⇒



$$U_{eb2}=(I_{b1}+g_mU_{b'e1})/(j\omega C_{b'e}+g_m/\alpha)\quad=(I_{b1}+\frac{g_mI_{b1}}{g_m/\beta+j\omega C_{b'e}})/(j\omega C_{b'e}+g_m/\alpha)$$

$$=I_{b1}(1+\frac{g_m}{g_m/\beta+j\omega C_{b'e}})/(j\omega C_{b'e}+g_m/\alpha)$$

整理得：

$$Z_i'=\frac{U_{eb2}}{I_{b1}}=\frac{1}{g_m/\beta+j\omega C_{b'e}}$$

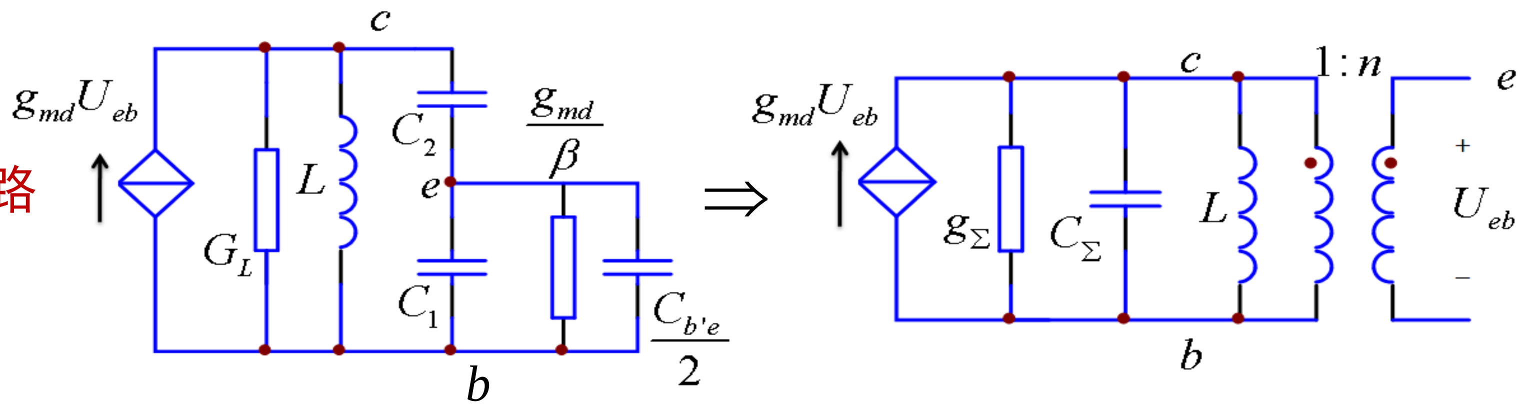
$$\begin{cases} g_m\text{为单管跨导，}\ g_{md}=\dfrac{g_m}{2}\text{为差分对跨导} \\ U_{eb}=2U_{eb2} \end{cases}$$

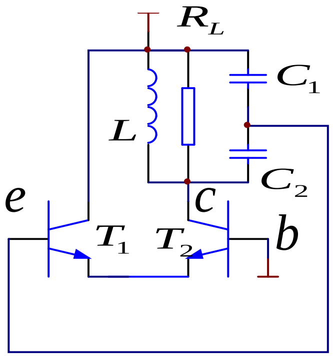
$Z_i=2Z_i'$，差分对相当于 g_{md}/β 和结电容 $C_{b'e}/2$ 并联

4. 3 正弦振荡器分析举例

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

②交流等效电路





$$n = \frac{C}{C_1} = 0.25 \qquad g_\Sigma = G_L + n^2 \frac{g_{md}}{\beta}$$

$$C_\Sigma = C + n^2 \frac{C_{b'e}}{2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + n^2 \frac{C_{b'e}}{2} = 1875.625\,pF$$

③起振幅度条件

$$AF = \frac{U_f}{U_{eb}} = \frac{nU_o}{U_{eb}} = \frac{ng_{md}}{g_\Sigma} > 1 \Rightarrow g_{md} > g_{md,\min} = \frac{G_L}{n(1-n/\beta)} \approx \frac{G_L}{n} = 4ms$$

$\because g_{mdQ} = 18.846 > g_{md,\min}$ $\therefore$满足起振幅度条件

4.3 正弦振荡器分析举例

④平衡状态

$$\frac{G_{m1}(x)}{g_{mdQ}}=\frac{g_{md,\min}}{g_{mdQ}}=\frac{4}{18.846}=0.1228$$

$$\frac{G_{m1}(x)}{g_{mdQ}}=\frac{4a_1(x)}{x}$$

查附录B.3，并利用插入法，可得 $x=11.88$

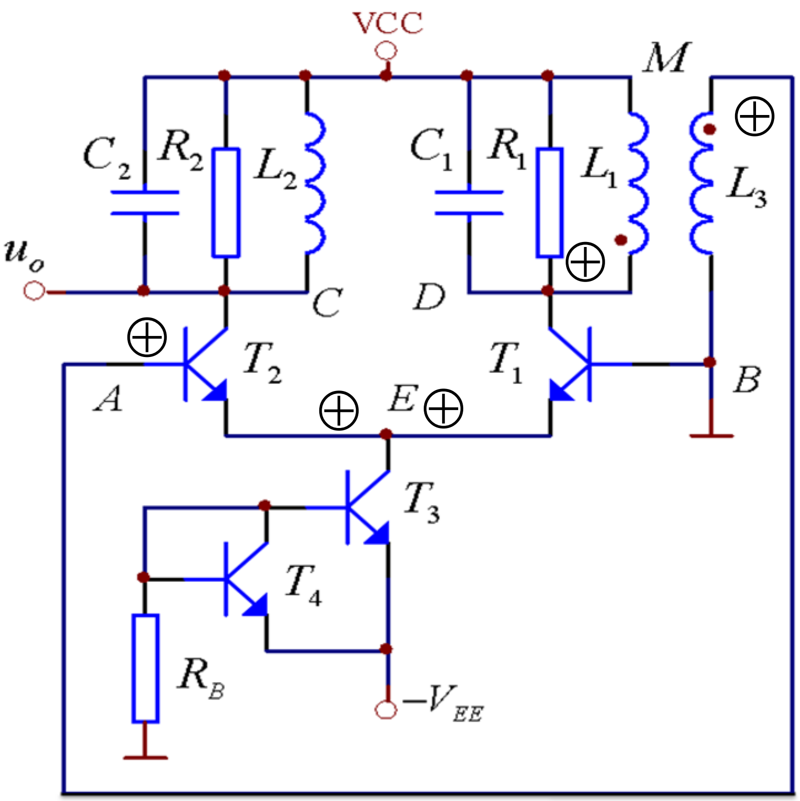
$$U_{osc}=\frac{x}{n}U_r=\frac{11.88}{0.25}\times 0.026=1.236V$$

$$f_{osc}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma}}}=11.62MHz$$

与单管振荡器相比，差分对管振荡器更为优越：

输出不含有偶次谐波，且奇次谐波成分也小，故失真大为减小。

4. 差分对管互感耦合OSC电路



电路特点:

(1) 两差分对管的集电极分别接有由L_1, C_1, R_1和L_2, C_2, R_2组成的并联谐振回路；

(2) 反馈电压U_f由T_1管的集电极取出，形成正反馈；

(3) 输出电压U_o由T_2管的集电极取出。

（4）只要T_2不工作在饱和区，负载与反馈环路就处于隔离状态，振荡器的频率稳定度与幅度稳定性都会有所提高；

$\omega_2 = \omega_1$: $u_o = V_{CC} - \alpha I_K a_1(x) R_2 \cos\omega_1 t$

$\omega_2 = 3\omega_1$: $u_o = V_{CC} - \alpha I_K a_3(x) R_2 \cos 3\omega_1 t$

4.3 正弦振荡器分析举例

- 作业：4.12 ， 4.13