

第 3 章 LC 正弦波振荡电路

本章知识点分布与结构安排

为明确本章知识结构与各知识点之间的关系,将本章主要内容以及重点和难点列于表 3-1 中。本章重点在于几种基本 LC 正弦波振荡电路的工作原理及各自的电路结构特点,难点在于如何判断一个电路能否产生振荡,这其中涉及了第 1 章中有关谐振回路失谐特性的内容。可以通过分析总结各个知识点之间的关联性,掌握 LC 正弦波振荡电路的构成、分析方法以及评价指标。

表 3-1 本章知识点及结构安排

	内容 1	内容 2	内容 3
主要内容	工作原理	电路构成 (本章重点)	案例分析 (应用)
知识点要求	振荡器的功能与实现方法	几种典型电路及各自的优缺点	电路设计过程中常见问题及解决思路
章节分布	3.1, 3.2	3.3, 3.4	3.5

3.1 概 述

问题:

- ① 振荡器的实质是什么?
- ② 振荡器与放大器的区别是什么?

振荡器与放大器的本质相同,都是能量转换器件。它们的主要区别在于:振荡器无须外加激励信号源,就能够自动地将直流电源所提供的直流能量转换为具有一定频率和波形的交流能量。

1. 正弦波振荡器在无线电收发机中的位置及作用

在无线电发射机中,正弦波振荡器位于整机的前端,如图3-1 所示,用来产生高频振荡信号,作为运载原始低频信息的载波。由于振荡器位于发射机最前端,因此,它输出信号的频率稳定性会直接影响整机的频率稳定性。

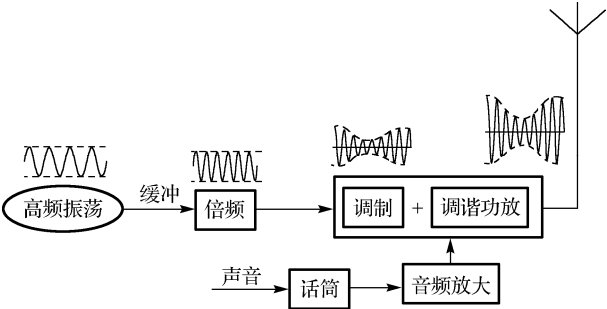


图 3-1 正弦波振荡器在无线电发射机中的位置

正弦波振荡器同时也是组成超外差接收机的重要部分,如图 3-2 所示,本地振荡就是正弦波振荡器产生的,本地振荡信号与天线接收来的载波信号通过混频,转换为固定频率的中频信号。

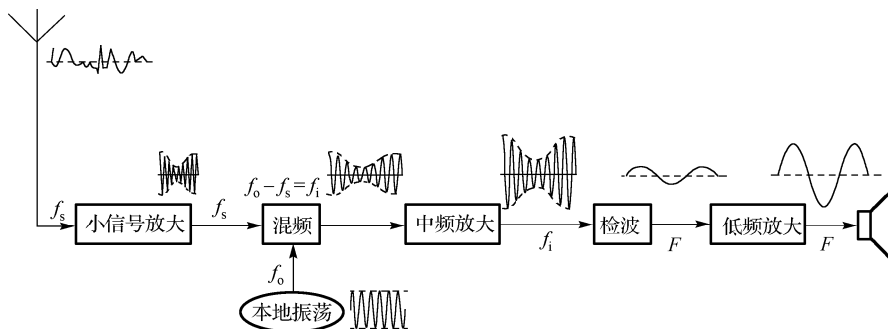


图 3-2 正弦波振荡器在超外差接收机中的位置

2. 正弦波振荡器的性能指标

正弦波振荡器用来产生具有一定频率的正弦波,因此,振荡频率是评价振荡器是否输出所需频率的性能指标。此外,振荡频率还应具有一定的稳定性,也称**频率稳定度**,即在规定的时间内,频率的变化不能太大,需要满足一定的要求。频率稳定度是衡量振荡电路稳定性能好坏的重要指标,可以用振荡器的实际振荡频率 f 与理论设计欲达到的标称频率 f_0 之间的差来表示绝对频率稳定度,即 $\Delta f = |f - f_0|$ 。而常用的相对频率稳定度(简称频率稳定度)是绝对频率稳定度与标称频率的比,即

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{|f - f_0|}{f_0} \quad (3-1)$$

这个比值越小,说明相对频率稳定度越高。

频率稳定度是在一定客观条件下测定的,包括一定的时间范围,一定的温度要求,或一定的电压变化区域。频率稳定度通常用 10 的负几次幂来表示,幂次方的绝对值越大,稳定度越高。如中波广播电台发射机的中期稳定度为 2×10^{-5} /日,电视发射台的频率稳定度为 5×10^{-7} /日,一般的 LC 振荡电路的频率稳定度比较低,为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ /日。

值得注意的是,不同结构的 LC 正弦波振荡器有不同的频率稳定度。如下面 3.3 节中介绍的克拉泼和西勒振荡器,在一天内的频率稳定度为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 。而 3.4 节中的石英晶体振荡器,频率稳定度可达 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ 数量级。因此,在设计振荡器时,要根据欲达到的频率稳定度要求确定电路形式,才可能达到预期的性能指标。

3. 典型电路

图 3-3 为 LC 正弦波振荡器,标称频率为 1.5MHz。根据构成振荡回路的电容元件 $C_2 \sim C_6$,以及电感 L_2 的连接关系,可以判断该振荡器的电路结构属于西勒振荡器。调节 C_5 可以微调振荡器输出信号频率, R_7 是阻尼电阻,用于降低电感 L_2 的 Q 值,以改善振荡波形。读者可以利用本书 1.3 节画交流等效电路图的方法,对图 3-3 进行交流等效分析。我们在下一节分析该振荡电路的工作原理。

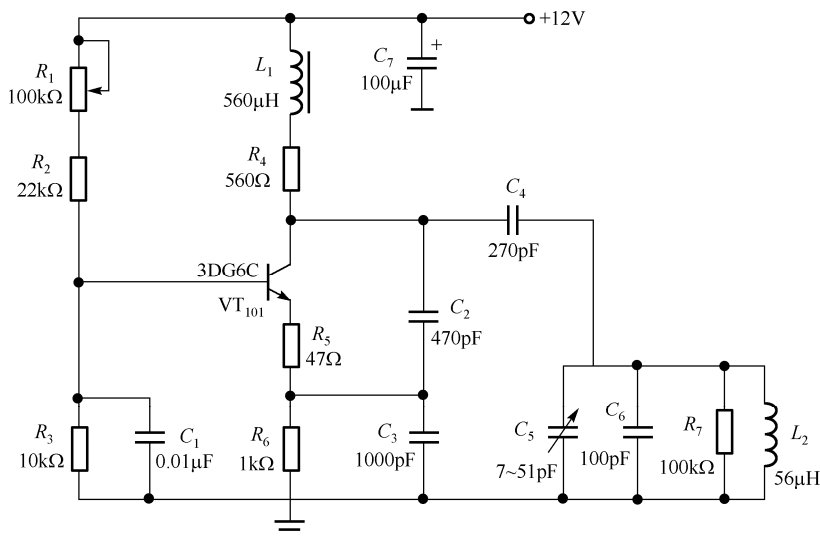


图 3-3 LC 正弦波振荡器电路

3.2 反馈型自激振荡器原理

3.2.1 工作原理

LC 正弦波振荡器属于反馈型振荡器，原理框图如图 3-4 所示。与一般的调谐放大电路相比较，振荡器的输入端少了激励信号源，而多出一个从输出到输入的反馈网络。当反馈信号和输入信号相位相同时，可以使输入信号增强，从而形成正反馈。另一方面，有源放大器中的非线性器件可以限制正反馈信号的无限增大，使输出信号维持在一定的幅值。

反馈型振荡器主要包括以下三部分。

有源放大：利用非线性的有源放大器件来实现，具有一定的功率增益，能够补偿振荡回路的功率损耗。图 3-3 所示的振荡电路中，有源器件晶体管 VT_{101} 及其外围电阻 $R_{101} \sim R_{106}$ ，构成了有源放大模块。

选频回路：具有调整振荡器工作频率，保持相位平衡与稳定的功能。图 3-3 的振荡电路中，电感 L_{102} 和电容 $C_{106} \sim C_{109}$ ，构成了 LC 并联谐振回路，完成选频功能。

反馈网络：把选频回路输出电压的一部分反馈至有源放大模块的输入端，并保证反馈电压与输入电压同相，实现正反馈。根据反馈电路的不同，反馈网络可分为互感反馈，电感反馈以及电容反馈。图 3-3 的振荡电路中，选频回路的一部分电压，通过电容 C_{107} 反馈至有源放大模块的输入端 u_{eb} ，属于电容反馈。

设振荡器中有源放大器的增益为 K ，相移为 φ_K ，正反馈网络的反馈系数为 F ，相移为 φ_F ，则振荡器的起振条件、平衡条件和稳定条件可以归纳于表 3-2 中。

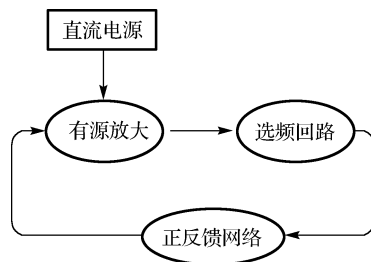


图 3-4 反馈型振荡器组成框图

表 3-2 振荡条件

起振条件	$KF > 1$; $\varphi_K + \varphi_F = 2n\pi$, n 为整数
平衡条件	$KF = 1$; $\varphi_K + \varphi_F = 2n\pi$, n 为整数
稳定条件	$\left. \frac{\partial K}{\partial u_i} \right _{KF=1} < 0$; $\left. \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \omega} \right _{\omega=\omega_0} < 0$ ($\varphi(\omega)$ 为选频回路的相频曲线)

3.2.2 相位平衡条件判断准则

振荡器的相位平衡条件判断可以依据表 3-2 给出的平衡条件，即振荡器中有源放大器的相移 φ_K 与正反馈网络的相移 φ_F ，两者之和为 2π 的整数倍。这也就意味着，反馈电压与输入电压相位相同，即反馈为正反馈。相位平衡条件是判断一个振荡电路能否工作的前提条件。

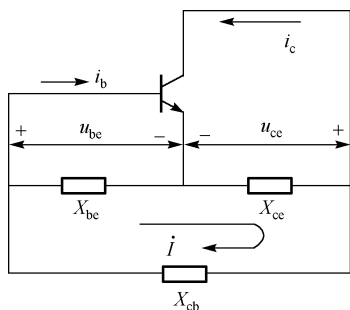


图 3-5 三点式振荡器的电路结构

实际中，有一类常用的三点式 LC 振荡器，它们的相位平衡条件具有共性。下面就分析三点式 LC 振荡器的相位平衡条件判断准则。

三点式 LC 振荡器指振荡器中组成 LC 选频回路的三个端点，分别与晶体管的三个电极连在一起。图 3-5 是三点式振荡器的交流等效原理图， X_{be} 、 X_{ce} 、 X_{cb} 表示构成选频回路的三个电抗元件，它们分别与晶体管 b、e、c 三个电极相连。设选频回路谐振时回路电流为 i ，则

$$\dot{U}_{be} = \dot{U}_f = jX_{be}i \quad (3-2)$$

$$\dot{U}_{ce} = \dot{U}_0 = -jX_{ce}i \quad (3-3)$$

联立式 (3-2) 和式 (3-3)，可得

$$\dot{U}_f = -\frac{X_{be}}{X_{ce}}\dot{U}_0 \quad (3-4)$$

由于共射极放大器输入输出电压的倒相作用， $\dot{U}_{be}$ 和 $\dot{U}_{ce}$ 的相位差为 π 。为保证正反馈，即反馈电压 $\dot{U}_f$ 与输入电压 $\dot{U}_{be}$ 同相，则 $\dot{U}_f$ 与 $\dot{U}_0$ 必须反相，因此由式 (3-4) 可知，电抗 X_{be} 与 X_{ce} 必须符号相同，即两者电抗性质相同。此外，为保证 LC 回路谐振，选频回路需满足 $X_{ce} + X_{be} + X_{cb} = 0$ ，也就是 $X_{ce} + X_{be} = -X_{cb}$ 。可见， X_{cb} 的电抗性质与 X_{be} 和 X_{ce} 相反。

经过以上分析可知，三点式 LC 振荡器相位平衡条件的判断准则可总结为，与发射极相连的两个电抗的性质要相同，而基极和集电极相连电抗的性质与之相反，可简称为“射同集（基）反”。该准则是由电路的相位平衡条件推得的，对三点式 LC 振荡器具有普遍适用性。只有满足这个准则，电路才有可能产生振荡。

3.3 三点式振荡电路分析

问题：

- ① 如何减小晶体管对振荡电路的影响？
- ② 如何扩大振荡电路的频率适用范围？
- ③ 总结各种三点式振荡器的优、缺点。

根据反馈支路的不同，三点式振荡器可以分为电感反馈三点式和电容反馈三点式。

3.3.1 电感反馈三点式振荡器

电感反馈三点式振荡器，也称为哈特莱（Hartley）电路，如图 3-6(a)所示。图中， C_1 为振荡回路电容； L_1 和 L_2 为回路电感； C_2 为隔直电容，隔离基极和振荡回路之间的直流通路； C_e 为旁路电容，使发射极交流等效接地。一般来说，耦合电容和旁路电容的电容值至少要比振荡回路电容值大一个数量级以上。由图 3-6(b)的交流等效图可见，振荡回路的三个端点 1、2、3 分别与晶体管的三个极——基极 b、发射极 e、集电极 c 相连，因此，构成三点式振荡器。而反馈支路 1-2 呈电感特性，因此，为电感反馈式振荡器。在不考虑电感 L_1 和 L_2 之间互感的情况下，反馈系数为 $F = L_2/L_1$ ，振荡频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C_1}}$ 。

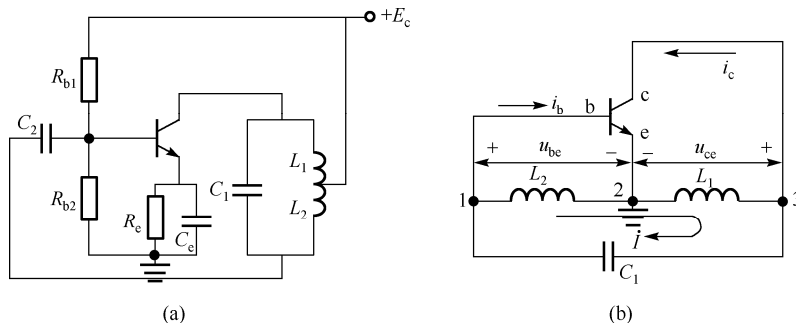


图 3-6 电感反馈三点式振荡电路

电感反馈三点式振荡器可以通过直接调整回路电容 C_1 的值来控制输出振荡频率，同时不影响电路的反馈系数。但由于电路的反馈电压取自电感，对高次谐波呈现高阻抗，所以反馈信号中的高次谐波成分较多，输出波形不理想。为进一步改善输出波形，可采用电容反馈三点式振荡器。

3.3.2 电容反馈三点式振荡器

电容反馈三点式振荡器，又叫考毕兹（Coplitts）振荡器，如图 3-7(a)所示。图中， C_1 、 C_2 为振荡回路电容； L 为振荡回路电感； C_3 和 C_4 为耦合电容，分别隔离基极和集电极与振荡回路之间的直流通路； C_e 为旁路电容，使发射极交流等效接地。 Z_L 为高频扼流圈，为集电极提供直流通路，同时阻隔交流信号进入直流电源。图 3-7(b)中，振荡回路的三个端点 1、2、3 分别与晶体管的三个极——基极 b、发射极 e、集电极 c 相连，因此，构成三点式振荡器。而反馈支路 1-2 呈电容特性，因此为电容反馈式振荡器。在不考虑晶体管等效输入、输出电容的情况下，反馈系数为 $F = C_1/C_2$ ，振荡频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L[C_1C_2/(C_1 + C_2)]}}$ 。

由于电容反馈三点式振荡器的反馈电压是取自电容的，对晶体管的非线性特性所产生的高次谐波呈现低阻抗，滤除谐波电流的能力较强，因此反馈信号中的高次谐波分量少，输出波形较好，接近于正弦波。可见，这一点相对于电感反馈三点式振荡器，有了进一步改善。同时由于晶体管的输入、输出电容与振荡回路的电容并联，在所求频率较高时，有时甚至可

以放弃回路电容，而直接利用晶体管本身的输入、输出电容作为振荡回路电容，频率可达几百兆赫，因此在超高频晶体管振荡器中，常常采用这种电路。

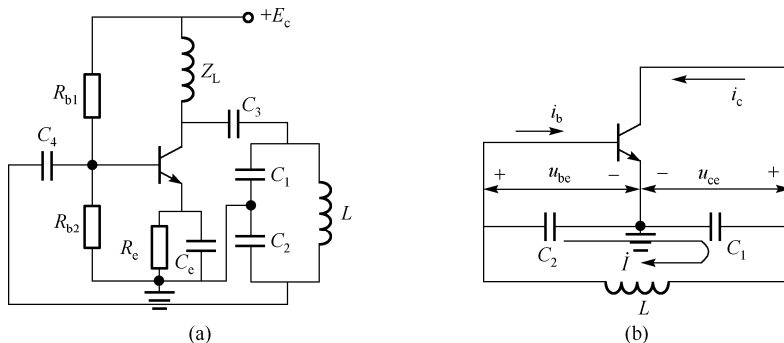


图 3-7 电容反馈三点式振荡电路

但由于考毕兹振荡器的反馈系数与回路电容有关，当通过改变回路电容的方法来调整振荡频率时，将改变反馈系数，这可能会引起起振条件变化，因而限制了振荡频率的提高。考虑晶体管等效输入电容 C_i 和输出电容 C_o 后，考毕兹振荡器的交流等效图如图 3-8 所示。可见反

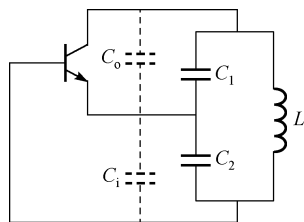


图 3-8 含晶体管极间电容的考毕兹振荡器

馈系数 $F = (C_1 + C_o) / (C_2 + C_i)$ ，振荡频率为 $f_0 = 1 / 2\pi\sqrt{LC_\Sigma}$ ，其中 $C_\Sigma = \frac{(C_1 + C_o)(C_2 + C_i)}{C_1 + C_2 + C_i + C_o}$ 。显然，由于晶体管本身极间电容的影

响，当外界工作环境改变或者需要更换晶体管时，振荡器的反馈系数、振荡频率与频率稳定度都会受到影响。为进一步提高电容反馈三点式振荡器的振荡频率范围和频率稳定度，可采用

改进型电容反馈三点式振荡器。

3.3.3 改进型电容反馈三点式振荡器

1. 克拉泼（Clapp）振荡器

克拉泼振荡器又叫串联改进型电容反馈三点式振荡器。它以考毕兹电路为基础，在基极和集电极之间的支路上串联一个小电容 C_3 ，要求 $C_3 \ll C_1$ ， $C_3 \ll C_2$ 。克拉泼振荡器电路如图 3-9(a)所示，图 3-9(b)为交流等效图。

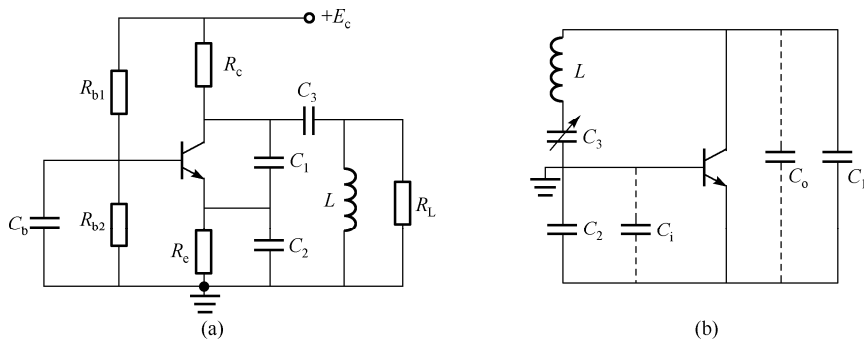


图 3-9 克拉泼振荡电路

考虑晶体管等效输入电容 C_i 和输出电容 C_o ，振荡回路总电容 C_Σ 可写为

$$\frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C_1 + C_o} + \frac{1}{C_2 + C_i} + \frac{1}{C_3} \quad (3-5)$$

由于所选电容 $C_3 \ll C_1$ ， $C_3 \ll C_2$ ，因而 $C_\Sigma \approx C_3$ 。振荡频率可近似为 $f_0 \approx 1/(2\pi\sqrt{LC_3})$ 。可见，调节 C_3 改变振荡频率时，不影响反馈系数。此外，由于 f_0 几乎与 C_i 和 C_o 无关，因此 C_i 和 C_o 的变化对 f_0 稳定性的影响可以忽略不计，从而提高了频率稳定度。

另一方面，分析克拉泼电路振荡回路等效电阻，如图 3-10 所示。将振荡回路谐振电阻 R 等效到晶体管 ce 两端，记为 R' 。 R' 对振荡回路的接入系数 $n = \frac{1/C_1}{1/C_\Sigma} \approx \frac{1/C_1}{1/C_3} = \frac{C_3}{C_1}$ ，则 $R' = n^2 R \approx \frac{Q}{\omega_0^3 LC_1^2}$ ，其中 $R = Q_L \omega_0 L$ 。可见，如果 n 过小，使 R' 下降太多而降低放大器电压增益，那么输出信号幅度将变化较大。因此， C_1 的值不能太大，同时 C_3 值不能太小。一般的短波通信机中， C_1 和 C_3 在几十到几百 pF 数量级。

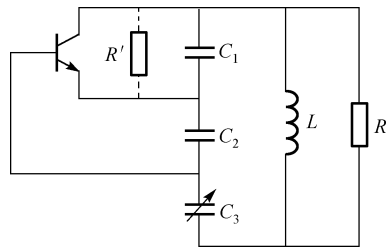


图 3-10 克拉泼电路输出等效分析

在保证输出信号幅度稳定的前提下，调节 C_3 来改变振荡频率 f_0 ，可获得的频率覆盖范围（即最高频率与最低频率之比）为 1.2~1.3。为进一步扩大振荡器的频率覆盖范围，可以采用西勒振荡器。

2. 西勒（Seiler）振荡器

西勒振荡器又名并联改进型电容反馈三点式振荡器，电路如图 3-11(a)所示，图 3-11(b)为交流等效图。与图 3-9 的克拉泼电路比较可见，西勒振荡电路在克拉泼电路的基础上，在振荡回路电感两端并联了一个可调电容 C_4 。

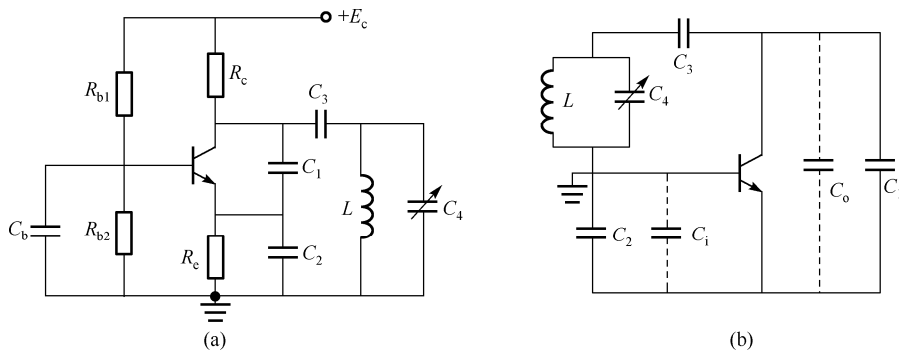


图 3-11 西勒振荡电路

由图 3-11(b)可得，振荡回路总电容为

$$C_\Sigma = C_4 + \frac{1}{\frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_1 + C_o} + \frac{1}{C_2 + C_i}} \approx C_4 + C_3 \quad (3-6)$$

振荡频率为 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC_\Sigma})$ 。可见，通过调节 C_4 改变振荡频率时， C_3 保持不变，这样就可以使接入系数 n 不变，从而减弱了振荡频率与输出信号幅度之间的相互制约关系。此时晶体

管等效输出电阻 $R' = n^2 Q_L \omega_0 L$ ，即其仅随 ω_0 的一次方改变，使得西勒振荡器的输出信号幅度在波段范围内变化比较平稳，频率覆盖系数较大，可达 1.6~1.8。

3.3.4 典型电路分析

在实际的三点式 LC 振荡电路中，振荡回路与晶体管三个极相连的各条支路有时是由多个电抗元件串/并联构成的。例如，图 3-12 所示的振荡电路，从它的交流等效图可以看出，该电路为考毕兹振荡器。但与集电极和发射极相连的振荡支路，不是纯电容，而是由电容 C_1 和电感 L_1 串联而成的。

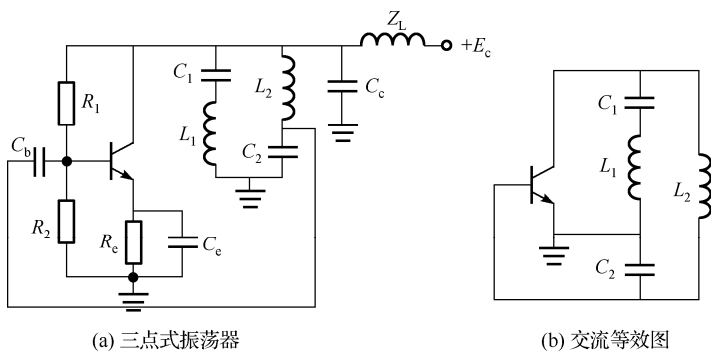


图 3-12 三点式 LC 振荡器电路

根据三点式振荡器的相位平衡判断准则，该电路若能振荡，必须满足在振荡电路工作频率 f_0 上， L_1 ， C_1 支路电抗性质为容性的条件。设 L_1 ， C_1 支路的串联谐振频率为 f_1 ， $f_1 = 1/(2\pi\sqrt{L_1 C_1})$ ，则当 $f_0 < f_1$ 时，相位平衡条件得到满足，电路才可能振荡。

对于如何求取振荡频率 f_0 的问题，通常可以根据振荡回路里电感、电容串/并联的连接关系来计算， $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_\Sigma C_\Sigma})$ ，其中 L_Σ ， C_Σ 分别表示振荡回路中的总电感和总电容。但在电感、电容连接关系不明显的情况下，如这里讨论的图 3-12 所示的振荡电路，可以由支路等效电抗求振荡频率。由于在振荡电路工作频率 f_0 上， L_1 ， C_1 支路电抗性质为容性，设该支路等效电容为 C_x ，则 L_1 ， C_1 支路的等效电抗可以表示为

$$\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} = -\frac{1}{\omega_0 C_x} \quad (3-7)$$

其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。而另一方面，振荡频率又可以表示为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_x C_2 / (C_x + C_2)}} \quad (3-8)$$

将式 (3-7) 中的 $1/C_x$ 代入式 (3-8)，可得

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2) C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}} \quad (3-9)$$

可见，这种将振荡支路等效为应呈现的电抗值来求解振荡频率的方法，物理意义明确，便于理解。还可以应用这种等效电抗的方法求解该电路的反馈系数 F ，留给读者自行完成。

3.4 晶体振荡电路分析

问题:

- ① 石英晶体为什么能够产生高稳定的正弦波?
- ② 石英晶体构成的振荡电路有什么特性?

上述三点式振荡电路的四种基本结构均是采用 LC 谐振回路作为振荡回路的。由于电感、电容元件的品质因数较低,所以上述四种振荡电路的频率稳定度并不高,一般在 10^{-3} 数量级左右。即使是克拉泼电路和西勒电路也只能达到 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 数量级。若是需要稳定度更高的振荡电路,则需要采用晶体振荡器。

晶体振荡器以压电晶体代替 LC 振荡回路中的电感而构成正弦波振荡电路,频率稳定度可以达到 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ 数量级,因此得到了广泛的应用。

3.4.1 石英晶体特性

1. 等效结构

石英晶体的化学成分是二氧化硅 (SiO_2)。在石英晶体块上按一定方位角切下一薄片,在其两面用喷涂金属的方法加上一对金属极板,就构成了最基本的石英晶体振荡元件。不同切割方法,可以获得不同谐振频率的晶体。晶体谐振频率越高,可以获得的频率稳定性越好。但一般当频率超过 100MHz 时,晶体的体积变得很小而使加工处理困难,因此,晶体振荡器适用频率范围也是有限的。

石英晶体有一种特殊的效应,称为**压电效应**。即当晶体两侧施加机械力时,晶体两侧将产生异号的电荷,从而形成电压;相反地,当晶体两侧施加电压时,晶体的几何尺寸或形态会发生变化,从而形成机械振动。当晶体两侧所施加交变电压的频率与晶体固有的机械振动频率相等时,晶体产生谐振,机械振动达到最强。石英晶体谐振器就是利用这一原理工作的。

石英晶体谐振器的电路表示符号如图 3-13(a)所示,它的电特性可以用电感电容来等效,如图 3-13(b)所示。其中 L_q 称为动态电感,类比于晶体的质量(惯性); C_q 称为动态电容,类比于晶体的振动弹性; r_q 称为动态电阻,类比于晶体在机械振动中的摩擦损耗; C_0 为晶体切片和金属极板构成的静电电容,也叫安装电容。石英谐振器的优势在于等效电感 L_q 非常大,约为 $10^{-3} \sim 10^2$ H,而 C_q 较小,约为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ pF, r_q 也很小,约为几十到几百欧姆,这样石

英谐振器的品质因数 $Q = \frac{1}{r_q} \sqrt{L_q / C_q}$ 就能够做得非常高,可以达到几万甚至几百万的数量级,

因此石英晶体谐振器的频率稳定度可以达到 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ 数量级。

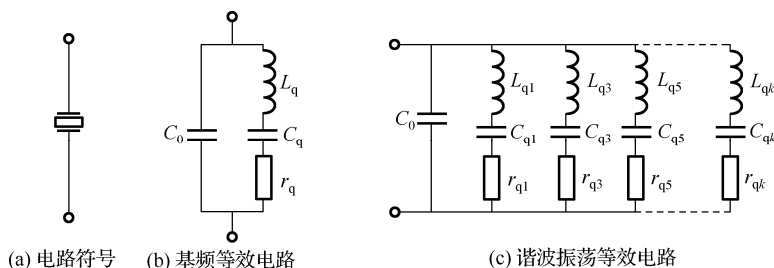


图 3-13 石英晶体谐振器的等效电路

石英晶体的振动具有多谐性，即除了基频振荡外，还有奇次谐波泛音振动。也就是说，石英晶体还可以在基波频率奇数次倍的谐波频率上发生谐振，等效电路如图 3-13(c)所示。通常，工作频率小于 20MHz 时采用基频晶体，高于 20MHz 时使用泛音晶体。

2. 阻抗特性

由图 3-13(b)可见，石英谐振器包含两个谐振频率：一个是串联谐振频率即

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}} \quad (3-10)$$

另一个是并联谐振频率即

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}} \quad (3-11)$$

由于 $C_q/C_0 \ll 1$ ，因此 f_s 与 f_p 之间的频率间隔非常小。在不考虑动态电阻 r_q 的条件下，石英谐振器的等效电路与电抗特性如图 3-14 所示。可见，当 $f_s < f < f_p$ 时，回路电抗呈感性。由于 f_s 与 f_p 之间的频率偏差很小，呈感性的阻抗特性曲线将非常陡峭，因而此特性对稳频有利。因此在实际应用中，石英晶体通常都工作于感性区，等效为一个电感。

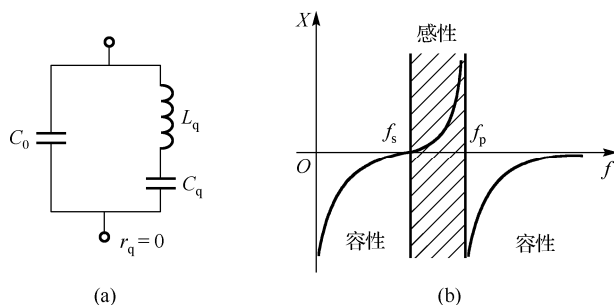


图 3-14 石英谐振器的电抗特性

3.4.2 石英晶振电路分析

将石英晶体谐振器作为高 Q 值的电感元件，代替 LC 振荡器中振荡回路的电感，就构成了石英晶体振荡电路。这类常用的电路称为并联型石英晶振电路，又名皮尔斯（Pierce）电路，如图 3-15 所示。图中 C 为可调电容，用来微调电路的振荡频率，使之等于石英晶体的标称频率。由图 3-15(b)的交流等效图可知，皮尔斯电路本质上是一个克拉泼振荡器。

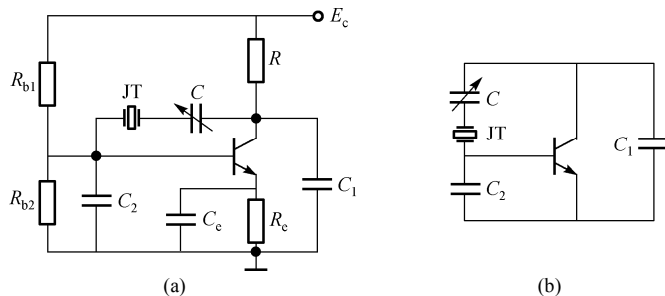


图 3-15 并联晶振电路

用图 3-14(a)的石英晶体等效电路代替图 3-15(b)中的石英晶体后, 得到图 3-16。把电感看成振荡回路的两端, 可以得到回路各电容的连接关系, 从而写出回路电容为

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_0 + \frac{1}{\frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}} \quad (3-12)$$

在 $C \ll C_1$, $C \ll C_2$ 的条件下, 式 (3-12) 近似为

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} \approx \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_0 + C_3} = \frac{C_q + C_0 + C_3}{C_q(C_0 + C_3)} \quad (3-13)$$

所以皮尔斯电路的振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C_q \frac{(C_0 + C_3)}{C_q + C_0 + C_3}}} \quad (3-14)$$

可见, 调节电容 C_3 可使振荡频率 f_0 产生波动。若 C_3 取值非常小, 小至极限 0, 则 $f_0 \approx f_p$ 为晶振的并联谐振频率; 若 C_3 取值非常大, 大到无穷, 则 $f_0 \approx f_s$ 为晶振的串联谐振频率。因而晶体振荡器总是工作在晶体的感性区间 f_s 和 f_p 之间, 等效为电感元件。实际电路中通常取晶振工作在 f_p 附近, 这里电抗特性曲线有非常大的斜率, 有利于稳频。

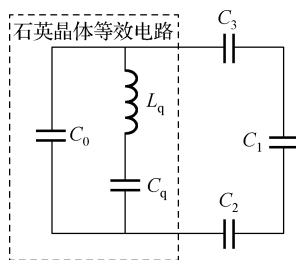


图 3-16 晶振等效电路结构

3.5 实用案例分析

实例 1: 西勒振荡器输出信号频率不可调或可调范围变小

在进行高频振荡器实验时, 要对实验电路进行一系列的调整和测试, 包括正确构建实验电路(短路帽的短接、切换开关的位置)、静态工作点的测试, 以及振荡器输出信号的调整等。在进行振荡器波段覆盖系数测试时, 需要调节可变电容 C_{110} (如第 6 章图 6-3 西勒振荡器实验电路图)。

现象: 调节电容 C_{110} 时, 输出信号频率 f_0 变化甚微。

分析与解决:

从调节电容 C_{110} 输出信号频率 f_0 变化甚微现象可看出, 问题在电容 C_{110} 和与之相关的其他元件; 用示波器观察到电路有正常正弦波形输出, 只是调节电容 C_{110} 时输出信号频率 f_0 的变化太小, 说明问题在电容 C_{110} 本身或与电路的连接线上; 将直流电源关断后用万用表电阻挡检查 C_{110} 与电路的连接线没问题, 因此问题就聚焦在电容 C_{110} 。

将有问题振荡电路中的电容 C_{110} 与正常振荡电路的电容 C_{110} 作调节对比试验, 发现在旋转电容 C_{110} 时, 没有旋转阻力或旋转阻力明显过小, 说明电容 C_{110} 确有机机械接触不良故障。更换电容 C_{110} 后实验电路恢复正常。

结论: 学生在实验中对 C_{110} 调节频度高, 因此容易出现机械接触不良的毛病。由此可推理到实际的电子设备出现故障时, 机械调节频度高的元件出现机械接触不良故障的可能性较大。

实例 2：在没有示波器的情况下，如何靠万用表检测振荡器起振与否？

在进行振荡器实验或调试自制 LC 振荡器时，需要判断其是否起振，一般情况下可使用示波器测量其输出波形，但没有示波器时，就得寻找一些简便的办法。

现象：没有示波器的情况下，如何利用万用表检查振荡电路是否起振？

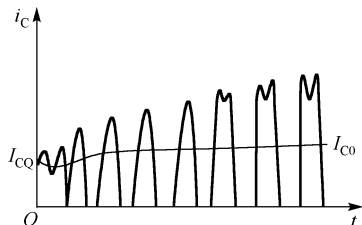
分析与解决：

图 3-17 振荡建立过程的电流曲线

由于没有示波器，只有靠万用表或耳机等简易工具来判断电路是否起振，但高频振荡器的频率超出音频范围，所以靠耳机来听振荡信号的办法不管用。万用表主要用来测量电路的直流电压，依靠测量直流电压能完成振荡器起振与否的判断吗？从振荡的建立过程可知，振荡器起振后的集电极电流平均值 I_{C0} 明显比未起振时 I_{CQ} 大（如图 3-17 所示），从而导致起振后晶体管的发射极电压 $V_e = I_e R_e = I_C R_e$

明显比未起振时大，因此可抓住这一特征来判断起振与否。对于短路 LC 振荡回路的电感，观察管子的发射极电压 V_e 是否变化，若短路振荡器电感前后发射极电压 V_e 变化，即为起振了，否则为未起振。

结论：在实际工作中，常常要在缺少常规工作条件的情况下，动脑筋设法利用手头上现有条件来解决实际问题。

实例 3：实验中振荡器没有波形输出怎么办？

现象：振荡器无输出，测量发射极电压时波形正常，万用表表笔一旦离开发射极，其波形消失。

分析与解决：

从现象看问题在发射极及相关元件，测发射极电压时有波形输出而停止测量就消失，说明原因可能是发射极有接触不良或电路缺少测量电压所形成的相应条件。通过观察发现：机械振动对振荡器的工作情况无影响，说明其故障不是接触不良而是缺少测量电压所形成的相应条件。由于测量发射极电压时，万用表与发射极电阻为并联关系，万用表的等效内阻使发射极电阻减小，发射极电流增大，所以停振的原因为发射极电流偏小所致。此时调整基极偏置电阻，使发射极电流适当增大，振荡器工作将恢复正常。

结论：小功率管在 3mA 以下，电压放大倍数随发射极电流增加而增加，当发射极电流过小时，不满足振荡器起振的幅度条件 $AF > 1$ ，而无法起振。

实例 4：测量 LC 振荡器静态工作点时，万用表的正确使用方法

现象：测量 LC 振荡器静态工作点时，同一块万用表的不同量程测量出的结果存在一定差异。

分析与解决：

由于用万用表测量 LC 振荡器静态工作点时，不同量程测量结果出现差异，说明问题在 LC 振荡器或万用表上。用万用表测量稳压电源的输出电压，发现其测量值也随不同的量程而略有变化，说明问题是由于万用表不同量程对振荡器静态工作点的影响不一样所致。

万用表的基本原理是利用一只灵敏的磁电式直流电流表（微安表）作表头，当微小电流通过表头，就会有电流指示。但表头不能通过大电流，所以，必须在表头上并联与串联一些

电阻进行分流或降压,从而测出电路中的电流、电压和电阻。在表头上串联一个适当的电阻(倍增电阻)进行降压,就可以扩展电压量程。改变倍增电阻的阻值,就能改变电压的测量范围。

对模拟电压表来说,电压表量程值越大,其内部倍增电阻越高,电压表的等效电阻(电压表内阻)就越大,改变挡位时,倍增电阻改变,相当于改变了被测量信号电路的负载。因此,改变电压表挡位会影响测量点的电压幅值。

解决办法是实验时尽量采用万用表的同一量程完成某处工作点的测量,记录数据时最好注明所选量程。

结论:

(1) 万用表的内部电路在测量时相当于负载,改变其挡位会对测量产生一定的影响。

(2) 为减小测量时更换量程带来的误差,尽量在万用表同一量程完成某处工作点的测量。注意测量时不能带电换量程,否则可能损坏电表。

实例 5: 西勒振荡器电路不起振

西勒振荡器在串联改进型电容反馈三点式振荡电路(克拉泼振荡器)的基础上,在晶体管集电极电感两端并联了一个小电容,以提高振荡频率的稳定性,能够作为产生更高振荡频率的振荡器,是振荡电路中被选用较多的电路形式之一。在搭建、调试该电路时却并不会很顺利。

现象: 按照理论估算的(西勒振荡器)元件参数选择元件并焊接完成振荡电路,用示波器观测振荡器没有波形输出。

分析与解决:

检查电路,若电气连接有问题,则及时排除;检查晶体三极管是否损坏,更换已损坏的晶体管。若估算的电容参数值不合适,则也不能使振荡电路起振。反馈电路中的电容值的参考数量级一般为 pF 级,应合理选用。

检查静态工作点设置是否合理:断开振荡回路电感 L ,调整基极所接电阻 R_{b1} 的值,使 $I_{c0}=V_{cc}/R_{c0}$ 设计值。用示波器观察振荡器输出端信号,配合工作点调整,直至取得良好波形。

结论: 西勒振荡器同一般的振荡器一样,振荡需要满足起振条件,同时注意静态工作点的调整。

实例 6: 振荡器单元电路没有输出

现象: 进行单元电路的调试时,振荡器电路安装完毕,上电后,没有信号输出。

分析与解决:

自行设计的振荡器电路,在整个电路焊接完成后,首先要用万用表检查并排除硬件电路电气上的问题。检查电路是否起振,用万用表测量发射极直流电压进行判断:起振后的射极电压值应大于静态(未振荡时)射极电压值。若是电路未起振,通常是由于静态工作点设置不当引起的,可将基极偏置电阻之一更换为电位器,便于调节工作点,使振荡电路正常工作。

结论: 振荡器没有起振,就没有信号输出,需要调节振荡器的起振参数。

实例 7: 振荡级与缓冲级相连时输出失真

现象: 输出电压幅度明显减小,波形失真变大。

分析与解决:

作为缓冲级的射极跟随器的作用是隔离主振级与后一级的连接,以减小后级对振荡器频

率稳定性和振荡波形的影响，理论上波形幅度应该没改变。用示波器观察到振荡器输出端波形良好，而在缓冲级输出端观察到波形幅度明显减小，且有失真，问题应该在缓冲级本身。断开振荡信号，用万用表测试缓冲级偏置电路，确定静态工作正常。由此排除因工作点不当造成的失真。

分析缓冲级电路，发射极的可变电阻 R_e 直接影响缓冲级的电压输出幅度。 R_e 变大，缓冲级输出电压幅度变小。当 R_e 过大时，输出波形幅度过小，失真明显。由此判定，这是因缓冲级的射极可变电阻调节不当引起的输出波形变形。接入振荡信号，调节发射极可变电阻，缓冲级输出波形良好。

结论：类似输出信号幅度变化、波形失真等问题，可以从电路的静态工作点设置以及各可调节元器件合理位置设定两方面考虑与排查。

实例 8：振荡器经缓冲级后输出无信号

现象：振荡器工作正常，通过缓冲级输出后信号丢失。

分析与解决：

首先断开缓冲级，用示波器观察振荡级输出，观察到输出正弦波信号良好，问题应该在与之相连的缓冲级。将振荡级与缓冲级相连，用示波器在缓冲级晶体管的基极仍可以观察到信号波形，说明耦合环节是正常的。

用示波器观察缓冲级晶体管的发射极输出，发现信号丢失，初步判断该晶体管有问题。用万用表测试与晶体管相连的各元件，排除损坏的可能性后，检查各部分连线、焊点均连接可靠，此时可确定缓冲级的晶体管故障。更换缓冲级晶体管后，实验电路将恢复正常。

结论：对于分立元件构成的电路，其好处之一是可以直观地观察电路的结构及所选用的各种器件。由于整个电路是完全裸露的，在用金属工具和探针调测时难免因不够细心而导致电路短路，因而器件损坏的概率相对较大。本例告诉我们在遇到输出无信号情况时，逐级检查，一一排除故障不失为一个好方法。

实例 9：振荡器输出经缓冲级后信号幅度变大

振荡器后面加缓冲级是为了减小后级电路对振荡电路的影响，使振荡频率相对稳定，并具有较强的带负载能力。缓冲级通常采用射极跟随器，它的电压增益不大于 1。如果振荡信号经射极跟随器后幅度变大，那么属反常现象。

现象：振荡器输出信号良好，经缓冲级后输出电压幅度增大。

分析与解决：

振荡器输出信号良好，说明问题出在缓冲级本身。通过示波器观察到缓冲级输出有信号，说明缓冲级电路能工作。用双踪示波器比较缓冲级与振荡级输出信号，发现缓冲级输出信号幅度大大超出振荡级输出信号幅度，但波形不失真。说明缓冲级电压增益大于 1，可以判断缓冲级电路组态不正确。

检查电路中缓冲级晶体管的连接方式，发现并没有接成射极跟随的方式，而是接成了共射电路。将缓冲级按共集电极电路形式连接，电路输出恢复正常。

结论：多级单元电路级联时，查找故障应逐级进行。如果需要，可将存在问题的电路与其前后级断开，单独排查，更有益于问题的解决。

实例 10: LC 振荡器工作时出现间歇振荡

现象: LC 振荡器工作时出现间歇振荡。

分析与解决:

间歇振荡是指振荡器工作时时而振荡、时而停振的一种现象。产生原因源于振荡器的自偏压电路参数选择不当。为避免间歇振荡发生,发射极偏置电阻 R_e 及其旁路电容 C_e 的乘积 $R_e C_e$ 时间常数取值不能过大,振荡管工作点应选得较低,起始自偏压也应较小。

结论: 一般来说,在正弦波振荡器中,间歇振荡是一种危害性很大的振荡现象,必须力求避免和消除。

实例 11: LC 振荡器工作于硬自激状态

现象: LC 振荡器工作于硬自激状态。

分析与解决:

在振荡器输入端预先加一个一定幅度的信号,振荡器才有起振的现象,称为**硬自激**。硬自激现象的发生,说明振荡器平衡状态的振幅稳定条件未能得到满足,晶体管的静态工作点取得太低,甚至为反向偏置,而且反馈系数 F 也较小。可以断开振荡回路与放大器的连接,或使振荡回路的电感短路,以便振荡器停振。调节晶体管基极偏置电阻,使发射极静态电流 I_e 增大。同时,增大反馈系数 F 。

结论: 振荡器应不需外加激励便可自激,即软自激。一般情况下都是使振荡电路工作于软自激状态,通常应当避免硬自激。